

DOSSIER PILOTE DES TUNNELS, DOCUMENT N° 5 : ENVIRONNEMENT



Ressources, territoires, habitats et logement Énergies et climat Développement durable Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent pour l'avenir

juillet 201

de l'Ecologie, du Développemen durable, des Transports et du Logement

Le dossier pilote des tunnels est composé de six documents :

- 1. Présentation Synthèse (à paraître)
- 2. Géométrie (décembre 1990)
- 3. Génie civil (novembre 1998)
- 4. Equipements
 - 4.1 Ventilation (novembre 2003)
 - 4.2 Eclairage (novembre 2000)
 - 4.3 Alimentation électrique (à paraître)
- 5. Environnement (juillet 2011)
- 6. Coûts (à paraître)

AVERTISSEMENT

Les guides sont l'aboutissement de travaux de synthèse, de réflexion méthodologique, de recherche, de retour d'expérience, menés ou commandités par le CETU. Ils ont vocation à servir de référence pour la conception, la réalisation ou l'exploitation des ouvrages souterrains. Comme tout état de l'art à un moment donné, un guide peut toutefois devenir un jour obsolète, soit du fait de l'évolution des techniques ou des réglementations, soit par la mise au point de méthodes plus performantes.

DOSSIER PILOTE DES TUNNELS, DOCUMENT N° 5 : ENVIRONNEMENT

juillet 2011

Centre d'Études des Tunnels

25, avenue François Mitterrand Case n°1 69674 BRON - FRANCE Tél. 33 (0)4 72 14 34 00 Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

Prealibule	1
1. Approche générale et principes de base de la prise en compte de l'environnement	
dans les projets de tunnel	9
1.1 Contexte réglementaire	10
1.2 De la conduite des études environnementales à l'organisation des travaux	16
1.3 Impacts environnementaux et mesures d'insertion	20
2. Tassements des sols	2:
2.1 Creusement des tunnels et tassements	22
2.2 Impacts et enjeux liés aux tassements des sols	23
2.3 Démarche d'étude	23
Méthodes et moyens d'évaluation Se Mesures de réduction des impacts	25 25
2.6 Dispositions réglementaires relatives aux tassements admissibles	30
2.7 Quelques références utiles	30
3. Vibrations solidiennes	3 1
3.1 Creusement des tunnels et vibrations solidiennes	33
3.2 Impacts et enjeux liés aux vibrations solidiennes	32
3.3 Démarche d'étude	33
3.4 Méthodes et moyens d'évaluation	34
3.5 Mesures de réduction des impacts	3.
3.6 Dispositions réglementaires ou normatives 3.7 Quelques références utiles	37
3.7 Quelques references utiles	30
4. Surpressions aériennes	39
4.1 Tir souterrain et surpressions aériennes	40
4.2 Impacts et enjeux liés aux surpressions aériennes	41
4.3 Démarche d'étude 4.4 Méthodes et moyens d'évaluation	4: 4:
4.5 Mesures de réduction des impacts	4:
4.6 Dispositions réglementaires ou normatives	44
4.7 Quelques références utiles	44
5. Bruit	45
5.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis de la problématique du bruit	40
5.2 Impacts et enjeux liés au bruit	48
5.3 Démarche d'étude de la pollution sonore	49
5.4 Méthodes et moyens d'évaluation du bruit 5.5 Mesures de réduction des impacts	50 5:
5.6 Réglementation	5. 5!
5.7 Quelques références utiles	56
6. Pollution de l'air	57
6.1 Tunnels et pollution atmosphérique	58
6.2 Impacts et enjeux liés à la pollution atmosphérique	60
6.3 Démarche d'étude "air et santé"	60
6.4 Méthodes et moyens d'évaluation	66
6.5 Mesures de réduction des impacts6.6 Dispositions réglementaires relatives à la pollution atmosphérique	60 6
6.7 Oudruge référence utilise	69

7. Consommation d'énergie et effet de serre	69
7.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis de l'énergie	70
7.2 Impacts et enjeux liés à la consommation d'énergie et à l'effet de serre	71
7.3 Démarche d'étude	72
7.4 Méthodes et moyens d'évaluation	72
7.5 Mesures de réduction des impacts	73
7.6 Dispositions réglementaires ou normatives	74
7.7 Quelques références utiles	74
8. Gestion des matériaux et déchets	75
8.1 Matériaux et déchets produits en tunnel	76
8.2 Impacts et enjeux liés à la gestion des déchets	77
8.3 Démarche d'étude	78
8.4 Méthodes et outils disponibles pour la gestion des déchets	80
8.5 Exemples de mise en œuvre d'opérations de traitement des déchets	83
8.6 Dispositions réglementaires	85
8.7 Quelques références utiles	86
9. Eau et assainissement	87
9.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du cycle de l'eau	88
9.2 Enjeux et impacts liés à l'eau	89
9.3 Démarche d'étude	90
9.4 Méthodes et moyens d'évaluation	93
9.5 Mesures de réduction des impacts	94
9.6 Dispositions réglementaires	95
9.7 Quelques références utiles	96
10. Milieu naturel	97
10.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du milieu naturel	98
10.2 Impacts et enjeux liés au milieu naturel	98
10.3 Démarche d'étude	99
10.4 Méthodes et moyens d'évaluation	101
10.5 Mesures de réduction des impacts	102
10.6 Dispositions réglementaires	103
	104
10.7 Quelques références utiles	104
11. Paysage et patrimoine	105
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine	105 106
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine	105 106 106
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine 11.3 Démarche d'étude	105 106 106 108
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine 11.3 Démarche d'étude 11.4 Méthodes et moyens d'évaluation	105 106 106 108 109
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine 11.3 Démarche d'étude 11.4 Méthodes et moyens d'évaluation 11.5 Mesures de réduction des impacts	105 106 106 108 109 110
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine 11.3 Démarche d'étude 11.4 Méthodes et moyens d'évaluation	105 106 106 108 109
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine 11.3 Démarche d'étude 11.4 Méthodes et moyens d'évaluation 11.5 Mesures de réduction des impacts 11.6 Dispositions réglementaires 11.7 Quelques références utiles	105 106 106 108 109 110 111
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine 11.3 Démarche d'étude 11.4 Méthodes et moyens d'évaluation 11.5 Mesures de réduction des impacts 11.6 Dispositions réglementaires 11.7 Quelques références utiles 12. Cadre de vie et activités humaines	105 106 106 108 109 110 111 112
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine 11.3 Démarche d'étude 11.4 Méthodes et moyens d'évaluation 11.5 Mesures de réduction des impacts 11.6 Dispositions réglementaires 11.7 Quelques références utiles 12. Cadre de vie et activités humaines 12.1 Spécificités des tunnels envers le cadre de vie et les activités	105 106 106 108 109 110 111 112
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine 11.3 Démarche d'étude 11.4 Méthodes et moyens d'évaluation 11.5 Mesures de réduction des impacts 11.6 Dispositions réglementaires 11.7 Quelques références utiles 12. Cadre de vie et activités humaines 12.1 Spécificités des tunnels envers le cadre de vie et les activités 12.2 Impacts et enjeux liés au cadre de vie et aux activités	105 106 106 108 109 110 111 112 113 114 114
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine 11.3 Démarche d'étude 11.4 Méthodes et moyens d'évaluation 11.5 Mesures de réduction des impacts 11.6 Dispositions réglementaires 11.7 Quelques références utiles 12. Cadre de vie et activités humaines 12.1 Spécificités des tunnels envers le cadre de vie et les activités 12.2 Impacts et enjeux liés au cadre de vie et aux activités 12.3 Démarche d'étude	105 106 106 108 109 110 111 112
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine 11.3 Démarche d'étude 11.4 Méthodes et moyens d'évaluation 11.5 Mesures de réduction des impacts 11.6 Dispositions réglementaires 11.7 Quelques références utiles 12. Cadre de vie et activités humaines 12.1 Spécificités des tunnels envers le cadre de vie et les activités 12.2 Impacts et enjeux liés au cadre de vie et aux activités 12.3 Démarche d'étude 12.4 Méthodes et moyens d'évaluation	105 106 106 108 109 110 111 112 113 114 114 115
11. Paysage et patrimoine 11.1 Spécificités des tunnels vis-à-vis du paysage et du patrimoine 11.2 Impacts et enjeux liés au paysage et au patrimoine 11.3 Démarche d'étude 11.4 Méthodes et moyens d'évaluation 11.5 Mesures de réduction des impacts 11.6 Dispositions réglementaires 11.7 Quelques références utiles 12. Cadre de vie et activités humaines 12.1 Spécificités des tunnels envers le cadre de vie et les activités 12.2 Impacts et enjeux liés au cadre de vie et aux activités 12.3 Démarche d'étude	105 106 106 108 109 110 111 112 113 114 114 115 116

PRÉAMBULE



Les préoccupations d'environnement, reconnues d'intérêt général, justifient des études à entreprendre aux différents stades d'élaboration des projets d'infrastructures. Dans la majorité des cas, c'est l'itinéraire qui fait l'objet d'études d'environnement et non le tunnel pris isolément. Mais dans le cas des tunnels, il se dégage un certain nombre d'aspects qui les différencient de tout autre ouvrage et dont les conséquences sur l'environnement doivent être analysées.

Ce sont ces aspects spécifiques qu'il a paru souhaitable de développer dans un fascicule spécial du Dossier Pilote des Tunnels. Il convient toutefois de préciser que la prise en compte de l'environnement doit être associée à tous les domaines du projet. Les indications données dans ce document ne sauraient apporter une réponse à chaque problème, car il convient de s'adapter dans chaque cas aux caractéristiques particulières du projet ou du site qui renforcent l'influence de tel ou tel critère.

Ce document, destiné prioritairement au maître d'ouvrage et aux professionnels qui l'assistent, comprend ainsi :

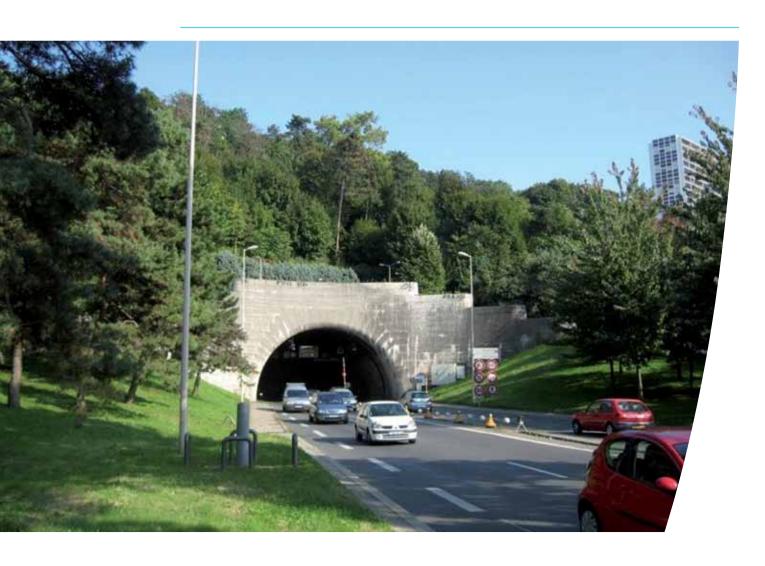
- un chapitre introductif qui rappelle le cadre réglementaire, présente les étapes clefs du déroulement d'un projet et la place qu'y prend l'environnement; ce chapitre définit également les notions d'impacts et de mesures d'insertion;
- une succession de chapitres thématiques :
 - > tassements,
 - > vibrations solidiennes,
 - > surpressions aériennes,
 - > bruit.
 - > pollution de l'air,
 - > consommation d'énergie et effet de serre,
 - > gestion des matériaux et déchets,
 - > eau et assainissement,
 - > milieu naturel.
 - > paysage et patrimoine.
 - > cadre de vie et activités humaines.

Pour chacun de ces thèmes environnementaux, le plan suivi est le même et traite :

- des spécificités d'un tunnel par rapport à un projet à l'air libre.
- des impacts et enjeux,
- de la démarche d'étude à mettre en œuvre,
- des méthodes et moyens disponibles pour l'évaluation des impacts,
- des mesures envisageables vis-à-vis de ces impacts,
- · des dispositions réglementaires spécifiques,
- de quelques références utiles.

Ce document ne traite pas de la sécurité et de la santé au travail ou sur le chantier, ces deux thèmes renvoyant à des réglementations spécifiques distinctes de celle de l'environnement.

1. APPROCHE GÉNÉRALE ET PRINCIPES DE BASE DE LA PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES PROJETS DE TUNNEL



1.1 CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

La réglementation environnementale est devenue très technique et relativement complexe. Elle s'est considérablement enrichie depuis plusieurs années, en particulier sous l'impulsion de directives européennes et au fur et à mesure des avancées scientifiques et techniques. Elle s'enrichit désormais des évolutions introduites par le **Grenelle de l'Environnement** lancé en juillet 2007 pour "lutter contre le changement climatique et s'y adapter, préserver la biodiversité ainsi que les services qui y sont associés, contribuer à un environnement respectueux de la santé, préserver et mettre en valeur les paysages" (article 1 de la loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement).

En regroupant dans un document unique les principales dispositions législatives et réglementaires, le **Code de l'Environnement** permet aujourd'hui un accès plus aisé aux textes en vigueur dans ce domaine.

Pour les projets d'ouvrage, au-delà des réponses sectorielles (protection de la ressource en eau, réduction des nuisances sonores, etc.), il s'agit également d'appréhender les différentes composantes environnementales de façon très intégrée, ceci à tous les stades du projet, des études amont à la maintenance et l'exploitation.

Suivant cette dernière logique, le présent chapitre réglementaire rappelle d'une part les principes fondamentaux qui doivent guider l'action environnementale du maître d'ouvrage, et d'autre part les outils d'évaluation environnementale institués par la réglementation, pour une meilleure approche intégrée des projets. Les aspects réglementaires propres à chaque thème environnemental sont pour leur part abordés aux chapitres dédiés à ces thèmes.

1.1.1 Les principes fondamentaux en matière de protection de l'environnement

En adoptant une **Charte de l'Environnement**, *la loi du 1^{er} mars 2005* a introduit dans la Constitution française un certain nombre de droits et de devoirs fondamentaux nouveaux. Applicables à tous, certains principes méritent d'être rappelés du fait des obligations de moyens et de résultats qu'ils peuvent imposer. Le **Code de l'Environnement** (CE) énonce quant à lui un principe général de la protection de l'environnement.

CHARTE DE L'ENVIRONNEMENT (LOI DU 1er MARS 2005)

DROITS FONDAMENTAUX

- droit de chacun de vivre dans un environnement équilibré et respectueux de la santé,
- droit pour chacun d'accès, dans les conditions et limites définies par la loi, aux informations relatives à l'environnement détenues par les autorités publiques, et de participer à l'élaboration des décisions publiques ayant une incidence sur l'environnement.

DEVOIRS FONDAMENTAUX

- devoir de toute personne de prendre part à la préservation et à l'amélioration de l'environnement,
- devoir de toute personne, dans les conditions définies par la loi, de prévenir les atteintes qu'elle est susceptible de porter à l'environnement, ou à défaut, d'en limiter les conséquences,
- devoir de toute personne de contribuer à la réparation des dommages qu'elle cause à l'environnement, dans les conditions définies par la loi,
- devoir des politiques publiques de promouvoir un développement durable.

ARTICLE L110-1 (CE)

- " I. Les espaces, ressources et milieux naturels, les sites et paysages, la qualité de l'air, les espèces animales et végétales, la diversité et les équilibres biologiques auxquels ils participent font partie du patrimoine commun de la nation."
- "II. Leur protection, leur mise en valeur, leur restauration, leur remise en état et leur gestion sont d'intérêt général et concourent à l'objectif de développement durable qui vise à satisfaire les besoins de développement et la santé des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Elles s'inspirent, dans le cadre des lois qui en définissent la portée, des principes suivants :

- > principe de précaution, selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable,
- > principe d'action préventive et de correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement, en utilisant les meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable,
- > principe pollueur-payeur, selon lequel les frais résultant des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur,
- > principe de participation, selon lequel chacun a accès aux informations relatives à l'environnement, y compris celles relatives aux substances et activités dangereuses, et le public est associé au processus d'élaboration des projets ayant une incidence importante sur l'environnement ou l'aménagement du territoire. "
- " III. L'objectif de développement durable, tel qu'indiqué au II, répond, de façon concomitante et cohérente, à cinq finalités :
 - > la lutte contre le changement climatique ;
 - > la préservation de la biodiversité, des milieux et des ressources;
 - > la cohésion sociale et la solidarité entre les territoires et les générations ;
 - > l'épanouissement de tous les êtres humains ;
 - > une dynamique de développement suivant des modes de production et de consommation responsables. "
- " IV. L'Agenda 21 est un projet territorial de développement durable. "

Ces préoccupations environnementales, du ressort de tous, concernent tout particulièrement les maîtres d'ouvrages publics, en particulier pour tous les travaux ou projets d'aménagement soumis à autorisation ou approbation *(art. L122-1 CE)*.

Les peines et sanctions applicables en cas de non respect de procédures environnementales ou en cas d'impacts dommageables (exemple : pollution accidentelle de cours d'eau) sont généralement précisées par les textes concernés. La loi n° 2008-757 du 1er août 2008 relative à la responsabilité environnementale précise, en application de la directive communautaire 2004/35/CE, la notion de responsabilité en matière de prévention et de réparation des dommages environnementaux. Elle vise la prévention et la réparation de certains dommages écologiques graves. Elle donne un contenu concret à l'obligation de réparation, selon le principe pollueur-payeur, en visant un retour à l'état avant dommage. Les dommages écologiques visés concernent les atteintes à l'état des sols, à celui des eaux, aux espèces et habitats naturels protégés.

1.1.2 Les outils d'évaluation environnementale

1.1.2.1 L'étude d'impact sur l'environnement

L'étude d'impact est la règle pour tous les projets de travaux, d'ouvrage ou d'aménagement entrepris par une collectivité publique ou nécessitant une autorisation ou une décision d'approbation. Lorsque la totalité des travaux prévus au programme correspondant est réalisée de manière simultanée, l'étude d'impact doit porter sur l'ensemble du programme. Lorsque la réalisation est échelonnée dans le temps, l'étude d'impact de chacune des phases de l'opération doit comporter une appréciation des impacts cumulés de l'ensemble du programme.

Le champ d'application de ce document d'évaluation environnementale des projets peut être synthétisé comme dans le tableau qui suit :

S'agissant d'opérations d'aménagement de tunnel, non visées dans les annexes I à IV du décret, donc non exemptées automatiquement d'étude d'impact mais également non soumises à notice d'impact, le seuil financier de 1,9 M€ TTC s'applique à la totalité des dépenses prévues pour l'aménagement (tunnel seul) ou du programme de travaux (tunnel intégré dans une opération routière plus globale), y compris lorsque le tunnel fait l'objet d'une rénovation fractionnée dans l'espace ou dans le temps. Le programme de travaux correspond à un ensemble d'opérations faisant l'objet d'autorisations distinctes et présentant entre elles un lien fonctionnel.

Des évolutions de ces dispositions sont en cours par le biais de la loi Grenelle II du 12 juillet 2010 qui réforme les études d'impacts sur l'environnement. Les modalités exactes de cette réforme sont soumises à décret mais la réforme proposée vise en particulier, par une meilleure transposition de la directive européenne 85/337/CE du 27 juin 1985, à préciser le champ d'application de l'étude d'impact, à mieux prendre en compte les critères de sensibilité des milieux et d'effets cumulés des projets, à garantir l'effectivité des mesures projetées dans l'étude et à donner plus d'ampleur aux droits que sont l'information et la participation du public.

Champ d'application des études d'impact (décret du 12 octobre 1977 + annexes)			
Projets de travaux, ouvrages, aménagements			
Soumis à étude d'impact	Soumis à notice d'impact	Dispensé d'étude d'impact	
Selon la nature du projet et/ou selon des seuils techniques précisés à l'annexe III* du décret	Catégories figurant à l'annexe IV* du décret	Travaux d'entretien et de grosse réparation	
Projets dont le montant est supérieur ou égal à 1 900 000 € TTC		Catégories figurant dans les annexes I* et II* du décret	
		Projets dont le montant est inférieur à 1 900 000 € TTC, à l'exception des opérations listées à l'annexe III* du décret	

^{*} annexes I à IV intégrées dans les articles R122.5 à R122.9 CE

Le contenu de l'étude d'impact à établir est précisé par l'*article* R122.3 CE.

LE CONTENU DE L'ÉTUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT (ART. R122.3 CE)

I. Le contenu de l'étude d'impact doit être en relation avec l'importance des travaux et aménagements projetés et avec leurs incidences prévisibles sur l'environnement.

II. L'étude d'impact présente successivement :

- une analyse de l'état initial du site et de son environnement, portant notamment sur les richesses naturelles et les espaces, naturels, agricoles, forestiers, maritimes ou de loisirs, affectés par les aménagements ou ouvrage;
- 2. une analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents du projet sur l'environnement, et en particulier sur la faune et la flore, les sites et paysages, le sol, l'eau, l'air, le climat, les milieux naturels et les équilibres biologiques, sur la protection des biens et du patrimoine culturel et, le cas échéant, sur la commodité du voisinage (bruits, vibrations, odeurs, émissions lumineuses) ou sur l'hygiène, la santé, la sécurité et la salubrité publique;
- les raisons pour lesquelles, notamment du point de vue des préoccupations de l'environnement, parmi les partis envisagés qui font l'objet d'une description, le projet présenté a été retenu;
- 4. les mesures envisagées par le maître d'ouvrage ou le pétitionnaire pour supprimer, réduire, et si possible compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement et la santé, ainsi que l'estimation des dépenses correspondantes;
- 5. une analyse des méthodes utilisées pour évaluer les effets du projet sur l'environnement mentionnant les difficultés éventuelles de nature technique ou scientifique rencontrées pour établir cette évaluation;
- 6. pour les infrastructures de transport, l'étude d'impact comprend en outre une analyse des coûts collectifs des pollutions et nuisances et des avantages induits pour la collectivité ainsi qu'une évaluation des consommations énergétiques résultant de l'exploitation du projet, notamment du fait des déplacements qu'elle entraîne ou permet d'éviter.

III. Afin de faciliter la prise de connaissance par le public des informations contenues dans l'étude, celle-ci fait l'objet d'un résumé non technique.

IV. Lorsque la totalité des travaux prévus au programme est réalisée de manière simultanée, l'étude d'impact doit porter sur l'ensemble du programme. Lorsque la réalisation est échelonnée dans le temps, l'étude d'impact de chacune des phases de l'opération doit comporter une appréciation des impacts de l'ensemble du programme.

L'étude d'impact n'est pas un acte administratif ou une procédure, mais une pièce constitutive d'un dossier, insérée dans une procédure d'autorisation ou d'approbation administrative de travaux, ou d'enquête publique faisant ou non partie d'une telle procédure. Elle constitue un outil fondamental de pédagogie et d'information du public. Elle doit donc être rédigée de façon claire et compréhensible par celui-ci (un résumé non technique est exigé à cet effet).

S'agissant de projets de tunnel, une attention particulière doit être apportée au volet santé de l'étude d'impact, à l'échelle du programme global mais aussi du tunnel proprement dit, compte tenu des incidences potentielles en phase de réalisation ou d'exploitation, liées notamment :

• aux opérations de percement du tunnel : stockage, transport

- et utilisation d'explosifs, vibrations solidiennes (impact sur les habitations et activités en surface), surpressions aériennes (impact du tir à l'explosif), etc.
- aux émissions de bruit (transport des déblais, engins de chantier, tirs d'explosif, trafic en phase d'exploitation, etc.),
- aux émissions polluantes dans le tunnel et leurs conséquences à l'extérieur du tunnel (extrémités du tunnel, ouvertures complémentaires dans la structure de l'ouvrage, bouches d'extraction),
- aux impacts éventuels sur la ressource en eau (régime hydrologique, qualité des eaux).

1.1.2.2 Les autres évaluations environnementales

L'étude d'incidence loi sur l'eau

Dans la grande majorité des cas, les travaux de création d'un tunnel sont susceptibles d'entraîner des incidences sur l'eau et sur les milieux aquatiques tant en phase de chantier (rejet des eaux issues des travaux de percement du tunnel, assainissement des voies de circulation des engins, des zones de stockage de produits et matériaux, etc.) que pendant son exploitation (drainage des eaux souterraines, collecte et rejets des eaux de lavage du tunnel, etc.). Ils seront à ce titre généralement soumis à la procédure d'autorisation ou de déclaration instituée par la *loi sur l'eau du 3 janvier 1992*.

L'assujettissement ou non du projet à ce régime d'autorisation ou de déclaration doit être apprécié par une confrontation systématique du projet ou du programme de travaux à tous les stades de réalisation (chantier, implantation d'ouvrages, maintenance et exploitation) avec la nomenclature spécifique instituée par la loi (décret du 29 mars 1993 modifié par le décret du 17 juillet 2006 – cf. art. R214.1 CE). La procédure d'instruction du projet au titre de la loi sur l'eau entraîne obligation de produire un document d'évaluation des incidences sur l'eau liées au projet.

RÉGIME D'INSTRUCTION DE LA LOI SUR L'EAU ET PROGRAMME DE TRAVAUX

Les études et documents correspondants devront porter sur l'ensemble des installations ou équipements exploités ou projetés par le pétitionnaire, qui par leur proximité ou leur connexité avec l'installation soumise à autorisation, sont de nature à participer aux incidences sur les eaux et milieux aquatiques (art.2 décret procédure). Si plusieurs ouvrages, installations ou catégories de travaux ou d'activités doivent être réalisés par la même personne, sur le même site, une seule demande d'autorisation peut être présentée pour l'ensemble de ces installations (art. R214.42 CE). Il est procédé à une seule enquête et un seul arrêté peut statuer sur l'ensemble et fixer les prescriptions prévues à l'art.13 du décret procédure (art. 214.15 et 16, R214.35 et 39 CE). Il en est obligatoirement ainsi quand il s'agit d'un ensemble d'ouvrages, d'installations, de travaux ou d'activités dépendant d'une même personne, d'une même exploitation ou d'un même établissement et concernant le même milieu aquatique, si cet ensemble dépasse le seuil fixé par la nomenclature des opérations ou activités soumises à autorisation, alors que les ouvrages, installations, travaux ou activités, réalisés simultanément ou successivement, pris individuellement, sont en dessous du seuil prévu par la nomenclature (art.10 décret procédure).

Cette étude d'incidence doit permettre de satisfaire aux objectifs généraux d'une gestion équilibrée de la ressource en eau dont les principes généraux (*art. L 211.1 CE*) sont rappelés ci-après.

PRINCIPES GÉNÉRAUX D'UNE GESTION ÉQUILIBRÉE ET DURABLE DE LA RESSOURCE EN EAU (ART. L211.1 CE)

La gestion équilibrée et durable de la ressource en eau vise à assurer :

- 1. La prévention des inondations et la préservation des écosystèmes aquatiques, des sites et des zones humides; on entend par zone humide les terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année;
- 2. La protection des eaux et la lutte contre toute pollution par déversements, écoulements, rejets, dépôts directs ou indirects de matières de toute nature et plus généralement par tout fait susceptible de provoquer ou d'accroître la dégradation des eaux en modifiant leurs caractéristiques physiques, chimiques, biologiques ou bactériologiques, qu'il s'agisse des eaux superficielles, souterraines ou des eaux de la mer dans la limite des eaux territoriales;
- 3. La restauration de la qualité de ces eaux et leur régénération,
- 4. Le développement, la mobilisation, la création et la protection de la ressource en eau ;
- 5. La valorisation de l'eau comme ressource économique et, en particulier, pour le développement de la production d'électricité d'origine renouvelable ainsi que la répartition de cette ressource.
- 6. La promotion d'une utilisation efficace, économe et durable de la ressource en eau.
- 7. Le rétablissement de la continuité écologique au sein des bassins hydrographiques.

La gestion équilibrée doit permettre en priorité de satisfaire les exigences de la santé, de la salubrité publique, de la sécurité civile et de l'alimentation en eau potable de la population. Elle doit également permettre de satisfaire ou concilier, lors des différents usages, activités ou travaux, les exigences :

- 1. de la vie biologique du milieu récepteur, et spécialement de la faune piscicole et conchylicole ;
- 2. de la conservation et du libre écoulement des eaux et de la protection contre les inondations ;
- 3. de l'agriculture, des pêches et des cultures marines, de la pêche en eau douce, de l'industrie, de la production d'énergie, en particulier pour assurer la sécurité du système électrique, des transports, du tourisme, de la protection des sites, des loisirs et des sports nautiques ainsi que de toutes autres activités humaines légalement exercées.

La *directive cadre sur l'eau du 23 octobre 2000*, retranscrite dans la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006, entraı̂ne par ailleurs une évolution importante du référentiel d'approche des objectifs, avec notamment :

- un objectif de non dégradation des eaux, depuis 2000,
- un objectif de bon état écologique et chimique pour les masses d'eau naturelles à l'échéance 2015,
- un objectif de bon potentiel écologique et de bon état chimique pour les masses d'eau artificielles ou fortement modifiées à l'échéance 2015.

Le contenu de la demande d'autorisation (*art. R214.6*) ou de déclaration (*art. R214.32*) à présenter par le pétitionnaire est précisé ci-après :

LE DOSSIER D'AUTORISATION OU DE DÉCLARATION "LOI SUR L'EAU"

- 1. Le nom et l'adresse du demandeur.
- 2. L'emplacement sur lequel l'installation, l'ouvrage, les travaux ou l'activité doivent être réalisés,
- 3. La nature, la consistance, le volume et l'objet de l'ouvrage, de l'installation, des travaux ou de l'activité envisagés, ainsi que la ou les rubriques de la nomenclature dans lesquelles ils doivent être rangés,
- 4. Un document (document d'incidence) :
 - indiquant les incidences directes et indirectes, temporaires et permanentes, du projet sur la ressource en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau et la qualité des eaux, y compris de ruissellement, en fonction des procédés mis en œuvre, des modalités d'exécution des travaux ou de l'activité, du fonctionnement des ouvrages ou installations, de la nature, de l'origine, et du volume des eaux utilisées ou affectées et compte tenu des variations saisonnières et climatiques ;
 - comportant l'évaluation des incidences du projet sur un ou plusieurs sites Natura 2000, au regard des objectifs de conservation de ces sites. Le contenu de l'évaluation d'incidence Natura 2000 est défini à l'article R. 414-23 et peut se limiter à la présentation et à l'exposé définis au I de l'article R. 414-23, dès lors que cette première analyse conclut à l'absence d'incidence significative sur tout site Natura 2000;
 - justifiant le cas échéant, de la compatibilité du projet avec le schéma directeur ou le schéma d'aménagement et de gestion des eaux et de sa contribution à la réalisation des objectifs visés à l'article L211-1 du code de l'environnement ainsi que des objectifs de qualité des eaux prévus par l'article D. 211-10;
 - précisant s'il y a lieu les mesures correctives ou compensatoires envisagées;
- 5. Les moyens de surveillance prévus et, si l'opération présente un danger, les moyens d'intervention en cas d'incident ou d'accident ;
- 6. Les éléments graphiques, plans ou cartes utiles à la compréhension des pièces du dossier, notamment de celles mentionnées aux 3 et 4.

L'évaluation d'incidence Natura 2000

Le terme Natura 2000 désigne un réseau écologique européen formé par des Zones de Protection Spéciale et des Zones Spéciales de Conservation. Dans ces zones, les états membres s'engagent à maintenir dans un état de conservation favorable les types d'habitats et d'espèces concernés.

Parallèlement à la mise en place de ce réseau, il a été institué pour les projets qui peuvent présenter des incidences notables sur ces sites un processus particulier d'évaluation environnementale relevant de régimes d'autorisation ou d'approbation administratives.

Le champ d'application correspondant est défini par l'article L 414.4 CE et a fait l'objet d'évolutions récentes. La $loi\ n^\circ 2008$ -757 $du\ 1er\ août\ 2008$ relative à la responsabilité environnementale a en effet établi un système de listes nationale et locales pour soumettre davantage de projets à évaluation des incidences.

Un décret en date du 9 avril 2010 (*article R. 414-19 CE*) fixe la liste nationale correspondante. Cette liste reprend notamment les catégories déjà soumises à évaluation des incidences dans le dispositif précédent et en particulier :

- les travaux et projets devant faire l'objet d'une étude ou d'une notice d'impact au titre des *articles L.122-1 à L.122-3 CE et des articles R.122-1 à R.122-16 CE*;
- les installations, ouvrages, travaux et activités soumis à autorisation ou déclaration au titre des *articles L. 214-1 à L. 214-11 CE* (régime d'instruction de la loi sur l'eau).

Des listes locales complémentaires à ce décret seront arrêtées par les préfets en fonction des enjeux locaux tandis qu'un second décret doit encore étendre le dispositif à des projets actuellement non encadrés par une autre réglementation.

Le contenu technique de cette évaluation des incidences est précisé (*art. R414.23 CE*) ci-après :

L'ÉVALUATION DES INCIDENCES NATURA 2000

I.- Le dossier comprend dans tous les cas :

- 1° Une présentation simplifiée du document de planification, ou une description du programme, du projet, de la manifestation ou de l'intervention, accompagnée d'une carte permettant de localiser l'espace terrestre ou marin sur lequel il peut avoir des effets et les sites Natura 2000 susceptibles d'être concernés par ces effets ; lorsque des travaux, ouvrages ou aménagements sont à réaliser dans le périmètre d'un site Natura 2000, un plan de situation détaillé est fourni;
- 2° Un exposé sommaire des raisons pour lesquelles le document de planification, le programme, le projet, la manifestation ou l'intervention est ou non susceptible d'avoir une incidence sur un ou plusieurs sites Natura 2000; dans l'affirmative, cet exposé précise la liste des sites Natura 2000 susceptibles d'être affectés, compte tenu de la nature et de l'importance du document de planification, ou du programme, projet, manifestation ou intervention, de sa localisation dans un site Natura 2000 ou de la distance qui le sépare du ou des sites Natura 2000, de la topographie, de l'hydrographie, du fonctionnement des écosystèmes, des caractéristiques du ou des sites Natura 2000 et de leurs objectifs de conservation.

II.- Dans l'hypothèse où un ou plusieurs sites Natura 2000 sont susceptibles d'être affectés, le dossier comprend également une analyse des effets temporaires ou permanents, directs ou indirects, que le document de planification, le programme ou le projet, la manifestation ou l'intervention peut avoir, individuellement ou en raison de ses effets cumulés avec d'autres documents de planification, ou d'autres programmes, projets, manifestations ou interventions dont est responsable l'autorité chargée d'approuver le document de planification, le maître d'ouvrage, le pétitionnaire ou l'organisateur, sur l'état de conservation des habitats naturels et des espèces qui ont justifié la désignation du ou des sites.

III.- S'il résulte de l'analyse mentionnée au II que le document de planification, ou le programme, projet, manifestation ou intervention peut avoir des effets significatifs dommageables, pendant ou après sa réalisation ou pendant la durée de la validité du document de planification, sur l'état de conservation des habitats naturels et des espèces qui ont justifié la désignation du ou des sites, le dossier comprend un exposé des mesures qui seront prises pour supprimer ou réduire ces effets dommageables.

IV.- Lorsque, malgré les mesures prévues au III, des effets significatifs dommageables subsistent sur l'état de conservation des habitats naturels et des espèces qui ont justifié la désignation du ou des sites, le dossier d'évaluation expose, en outre :

- 1° La description des solutions alternatives envisageables, les raisons pour lesquelles il n'existe pas d'autre solution que celle retenue et les éléments qui permettent de justifier l'approbation du document de planification, ou la réalisation du programme, du projet, de la manifestation ou de l'intervention, dans les conditions prévues aux VII et VIII de l'article L. 414-4;
- 2° La description des mesures envisagées pour compenser les effets dommageables que les mesures prévues au III ci-dessus ne peuvent supprimer. Les mesures compensatoires permettent une compensation efficace et proportionnée au regard de l'atteinte portée aux objectifs de conservation du ou des sites Natura 2000 concernés et du maintien de la cohérence globale du réseau Natura 2000. Ces mesures compensatoires sont mises en place selon un calendrier permettant d'assurer une continuité dans les capacités du réseau Natura 2000 à assurer la conservation des habitats naturels et des espèces. Lorsque ces mesures compensatoires sont fractionnées dans le temps et dans l'espace, elles résultent d'une approche d'ensemble, permettant d'assurer cette continuité;
- 3° L'estimation des dépenses correspondantes et les modalités de prise en charge des mesures compensatoires, qui sont assumées, pour les documents de planification, par l'autorité chargée de leur approbation, pour les programmes, projets et interventions, par le maître d'ouvrage ou le pétitionnaire bénéficiaire, pour les manifestations, par l'organisateur bénéficiaire.

L'étude d'impact, la notice ou le document d'incidence loi sur l'eau peuvent tenir lieu de dossier d'évaluation des incidences Natura 2000, s'ils satisfont aux prescriptions du régime d'évaluation des incidences précisées ci-dessus. Dans ce cas, l'évaluation d'incidences complète, sans le remplacer, le volet "milieu naturel" de l'étude d'impact, de la notice ou du dossier d'incidence loi sur l'eau, puisqu'elle est centrée uniquement sur les habitats naturels et les espèces d'intérêt communautaire.

ATTENTION : comme le rappelle la circulaire du 5 octobre 2004 relative aux évaluations d'incidences Natura 2000, cette évaluation comporte certaines spécificités par rapport aux études d'impact :

- elle est ciblée sur les habitats naturels et les espèces d'intérêt communautaire :
- le caractère d'effet dommageable doit être déterminé à la lumière des caractéristiques et des conditions environnementales spécifiques du site concerné, compte tenu des objectifs de conservation et de restauration définis dans son document d'objectif;
- les raisons impératives d'intérêt public doivent être fortement motivées, la seule utilité publique ne suffisant pas à justifier sa réalisation;
- les mesures compensatoires éventuelles, qui ont pour but principal d'assurer la cohérence globale du réseau Natura 2000, doivent :
 - > couvrir la même région biogéographique ;
 - > viser dans des proportions comparables les habitats et espèces devant subir des effets dommageables;
 - > assurer des fonctions écologiques comparables telles qu'elles apparaissent dans les données écologiques (formulaire standard de données, document d'objectif) qui ont répondu aux critères de sélection du site;
 - > définir clairement les objectifs et les modalités de gestion de manière à ce que ces mesures compensatoires puissent contribuer effectivement à tout moment de la réalisation du projet à la cohérence du réseau Natura 2000.

1.1.2.3 Le bilan environnemental (LOTI)

La Loi d'Orientation des Transports Intérieurs (loi LOTI) du 30 décembre 1982 a instauré dans son article 14 le principe d'évaluation des grands projets d'infrastructures sur la base de critères homogènes intégrant les impacts des effets externes des transports relatifs notamment à l'environnement, à la sécurité et à la santé, et permettant de procéder à des comparaisons à l'intérieur d'un même mode de transport et entre différents modes ou combinaisons de modes. Lorsque ces opérations sont réalisées avec le concours de financements publics, un bilan des résultats économiques et sociaux est établi au plus tard 5 ans après leur mise en service. Le terme "bilan des résultats économiques et sociaux" ne doit pas conduire à exclure les considérations environnementales qui font partie du bilan souhaité par la LOTI.

Sont en particulier considérés comme grands projets d'infrastructure de transport devant faire l'objet de ce bilan (au sens du décret d'application de la LOTI n° 84-617 du 17 juillet 1984) :

- la création d'une voie rapide à 2 x 2 voies d'une longueur supérieure à 25 km,
- les grands projets d'infrastructure de transport d'un coût supérieur ou égal à 83 millions d'euros.

Pour les travaux dont la maîtrise d'ouvrage appartient aux communes, départements, régions et à leurs groupements,

sont en outre pris en compte les projets de route nouvelle d'une longueur supérieure à 15 km et soumis à étude d'impact sur l'environnement.

Pour les projets relevant de la maîtrise d'ouvrage de l'État, la circulaire Bianco du 15 décembre 1992 a clarifié les éléments attendus dans le cadre du bilan LOTI et en particulier ceux concernant le bilan environnemental. Ces éléments sont précisés dans l'encadré ci-après et peuvent par extension être suivis par les maîtres d'ouvrage que sont les collectivités locales.

UN BILAN ENVIRONNEMENTAL APRÈS RÉALISATION POUR QUOI FAIRE ?

Établi un an après la mise en service, puis entre 3 et 5 ans après celle-ci, le bilan environnemental répond à plusieurs objectifs concrets:

- vérifier la réalisation effective des mesures environnementales prévues par rapport aux divers engagements pris (notamment dans le cadre des dossiers d'engagement de l'État, pour les projets relevant de la maîtrise d'ouvrage de celui-ci)
- évaluer les effets réels de l'infrastructure prévus ou non,
- expliquer les écarts entre les effets prévus et constatés, et proposer si nécessaire des mesures correctrices,
- capitaliser le retour d'expérience pour d'autres études similaires,
- restituer les informations auprès du public.

Il est à noter que la loi Grenelle II du 12 juillet 2010 a renforcé le dispositif visant à assurer l'effectivité des mesures environnementales.

La décision de l'autorité compétente qui autorise le pétitionnaire ou le maître d'ouvrage à réaliser le projet fixe les mesures à la charge du pétitionnaire ou du maître d'ouvrage destinées à éviter, réduire et, lorsque c'est possible, compenser les effets négatifs notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine ainsi que les modalités de leur suivi. Désormais, des agents assermentés ou habilités peuvent effectuer des contrôles sur l'application de ces mesures, à tout moment, en visitant notamment les lieux concernés.

1.1.3 L'instruction des projets soumis à avis de l'autorité environnementale

Conformément aux dispositions du décret n°2009-496 du 30 avril 2009 et de la circulaire d'application du 3 septembre 2009, les projets soumis à étude d'impact, quel que soit le maître d'ouvrage, doivent être soumis à l'avis de l'autorité environnementale.

L'autorité environnementale est :

 le Conseil général de l'environnement et du développement durable, pour les projets entrepris sous maîtrise d'ouvrage du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), de ses services déconcentrés ou établissements publics, et pour les projets relevant d'une décision du MEDDTL ou pris sur rapport du ministre d'État.

- le Commissariat général du développement durable (CGDD), pour les autres projets relevant d'un niveau de décision national (autre que le MEDDTL),
- le préfet de Région, dans tous les autres cas.

L'avis émis par l'autorité environnementale porte à la fois sur la qualité de l'étude d'impact et sur la manière dont l'environnement est pris en compte dans le projet. Il comporte une analyse du contexte du projet, du caractère complet de l'étude d'impact, de sa qualité, du caractère approprié des informations qu'il contient, de la prise en compte de l'environnement par le projet, et notamment de la pertinence et la suffisance des mesures d'évitement, de réduction voire de compensation des impacts.

Cet avis est émis dans un délai maximum de deux mois à compter de l'accusé de réception d'un dossier jugé recevable (complet et régulier). Il est par ailleurs joint au dossier d'enquête publique, et publié par voie électronique (site internet de l'autorité chargée de recueillir cet avis).

Il est donc important d'intégrer ces délais (recevabilité du dossier puis avis par l'autorité environnementale) dans le planning général de l'opération envisagée. La mise en place de cette procédure d'avis de l'autorité environnementale, doit contribuer à l'amélioration de la qualité technique des études d'impact. Il est important de rappeler que le pétitionnaire peut solliciter l'autorité compétente pour approuver le projet afin de lui faire préciser les informations qui devront figurer dans l'étude d'impact (art R122-2 du code de l'environnement, relatif à la demande de cadrage préalable). On ne peut qu'encourager la mise en œuvre de ce cadrage préalable le plus en amont possible des études.

1.2

DE LA CONDUITE DES ÉTUDES ENVIRONNEMENTALES À L'ORGANISATION DES TRAVAUX

1.2.1 L'articulation des études environnementales avec les études d'élaboration du projet

Les études environnementales sont menées parallèlement aux diverses études d'élaboration du projet suivant un processus continu et itératif, l'acceptabilité des impacts conditionnant la poursuite des études sur les hypothèses retenues. Sur le réseau national, les modalités d'élaboration, d'instruction, d'approbation et d'évaluation des opérations d'investissement routier sont définies par circulaire du 7 janvier 2008. Les principales étapes et productions sont récapitulées dans le *tableau 1*.

Au sein des chapitres thématiques 2 à 12 qui traitent des différents sujets d'environnement, les étapes relatives à la démarche d'étude et de réalisation ont volontairement été simplifiées par rapport au déroulement présenté dans ce tableau. Il n'est alors plus fait référence qu'à trois phases :

- les études amont c'est-à-dire l'ensemble des études qui précèdent l'enquête publique,
- · les études de conception,
- · l'exécution.

Ces différentes phases intègrent les éléments de réflexion relatifs à la phase exploitation, durant laquelle interviennent les bilans visés dans le tableau 1.

Les études amont regroupent :

- les études d'opportunité: tous les grands projets d'infrastructures de transport doivent faire l'objet d'un débat sur leur intérêt économique, social et environnemental. Au cours de cette étude d'opportunité, toutes les grandes fonctions de l'infrastructure sont étudiées dans une approche multimodale.
- les études préalables à l'enquête publique appelées études préliminaires au sens de la loi relative à la maîtrise d'ouvrage publique dite loi MOP : elles permettent d'alimenter le dossier d'enquête publique et comportent deux étapes chronologiques importantes :
 - > la comparaison des variantes lors de laquelle les différentes alternatives sont étudiées. Il est à noter que cette étude doit se faire sur la base des impacts résiduels, donc avec intégration des éventuelles mesures d'atténuation. Certains impacts sont par ailleurs non réductibles (exemple : disparition d'un biotope rare) alors que d'autres le sont plus classiquement (exemple : protection phonique de riverains). Il convient bien évidemment d'intégrer dans cette analyse les impacts positifs que peut générer le projet, tout particulièrement dans le cas d'un tunnel, qui a des incidences généralement positives sur les activités en surface.
 - > l'étude de la variante proposée qui sert à établir l'étude d'impact, qui constituera le dossier technique support pour l'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique. A l'issue de la phase d'étude de la variante proposée, le niveau d'approfondissement doit être suffisamment précis pour que le maître d'ouvrage fixe l'évaluation préalable de l'opération.

	Phase	Productions	Évaluations environnementales
		Dossier d'étude d'opportunité	Volet environnemental du dossier d'étude d'opportunité
Études d'opportunité		Dossier de saisine de la Commission Nationale de Débat Public (CNDP)	Volet environnemental du dossier de saisine
l		Dossier de débat public ou de concertation	Volet environnemental du dossier de débat public
amont	Études préalables	Dossier d'études préalables	Volet environnemental des études préalables
Études amont	(ou études préliminaires au sens de la loi relative à la maîtrise d'ouvrage publique dite loi MOP)	Dossier d'enquête publique	Étude d'impact sur l'environnement Dossier loi sur l'eau (si définition suffisante du projet) Dossier d'incidence Natura 2000 (si requis)
	Finalisation du programme	Déclaration d'utilité publique	
	(au sens de la loi relative à la maîtrise d'ouvrage publique dite	Programme de l'opération	Volet environnemental du programme Dossier des engagements de l'État
loi MOP)		Dossier d'engagement de l'État	
a, c	Mise au point de l'avant projet	Dossier d'avant-projet	Volet environnemental de l'avant projet
s de ptioi		Dossier de projet	Volet environnemental du dossier de projet
Conception détaillée		Autres dossiers réglementaires	Dossier loi sur l'eau (si non réalisé au stade enquête) Dossier d'incidence Natura 2000 (si évolutions significatives)
Exécution	Réalisation des travaux	Dossier de consultation des entreprises	Schéma Organisationnel du Plan Assurance Environnement <i>(Cf. chapitre 1.2.5)</i>
Exploitation	Bilans et évaluations	Bilan LOTI	Bilan Loti environnemental

Tableau 1 : l'environnement au sein des principales étapes de production d'un projet

Globalement, ces études nourriront l'enquête publique qui vise à recueillir l'avis du public sur l'infrastructure projetée, c'est-à-dire en démontrer l'utilité publique par la concertation, recueillir les avis du public, déterminer la variante à étudier et décider des mesures d'accompagnement associées dans le dossier des engagements du maître d'ouvrage. Elle débouche sur la déclaration d'utilité publique (DUP) et prépare la réalisation du projet.

Au stade des études de conception, on peut distinguer :

- l'avant-projet : il est mis au point à partir des caractéristiques de l'opération déclarée d'utilité publique, des engagements du maître d'ouvrage et du programme validé dont il concrétise la réponse technique. Il permet d'adopter le coût de référence et d'ajuster le programme à la marge.
- les études de projet qui permettent d'étudier avec précision l'ouvrage et son coût tels qu'ils seront définis lors de la passation du marché.

Enfin, **l'exécution** marque la réalisation effective du projet. Elle est précédée de l'élaboration du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE).

Les formes nouvelles de partenariat et notamment celles qui font appel à un financement public-privé, ou encore celles qui

impliquent très tôt le groupement constructeur dès la conception de l'avant projet ne modifient pas le principe de découpage du processus en trois grandes phases.

1.2.2 La définition et le pilotage de l'étude d'impact

Les objectifs fondamentaux de l'étude d'impact sont :

- concevoir un meilleur projet pour l'environnement,
- fournir au maître d'ouvrage des éléments d'aide à la décision,
- éclairer l'autorité administrative sur la décision à prendre,
- informer le public et le faire participer à la décision.

Ce document est entrepris sous la responsabilité pleine et entière du maître d'ouvrage, qui doit en valider tous les aspects. Cette responsabilité se décline à plusieurs niveaux :

- définition des besoins techniques et fonctionnels de l'ouvrage, en interaction avec les aspects environnementaux,
- définition du contenu technique et de l'organisation générale des études d'environnement à réaliser,
- détermination des objectifs à atteindre (propres au maître d'ouvrage, au delà de la réglementation),

- vérification de l'atteinte des objectifs et des obligations de résultats.
- alternatives techniques à étudier et motivation des choix retenus, notamment du point de vue de l'environnement,
- pertinence et efficacité des mesures d'atténuation et de compensation proposées (intégrant les principes fondamentaux de précaution et de prévention à la source),
- suivi des effets et ajustements éventuels aux effets constatés.

Il importe donc d'assurer un véritable pilotage des études d'environnement, en cadrant très clairement la commande sur le plan opérationnel (au delà du simple énoncé du contenu théorique de l'étude d'impact) et en procédant à un suivi et un contrôle très rigoureux des prestations remises.

LES POINTS CLEFS DE LA CONDUITE DES ÉTUDES

Dans le cadre du cadrage de la commande, il convient de bien préciser :

- les aires d'études, adaptées aux différents thématiques environnementales et à l'étendue des impacts potentiels,
- les échelles de temps à appréhender, intégrant les différentes phases de réalisation du projet, les impacts immédiats et différés à plus ou moins long terme, les dynamiques d'évolution de l'aire d'étude indépendamment du projet,
- les enjeux principaux à bien appréhender,
- les sources d'informations connues et utiles,
- les méthodes d'investigation et d'analyses préconisées, adaptées aux enjeux, au niveau de définition des études,
- les moyens humains et organisationnels à mettre en oeuvre,
- le type de rendu des prestations.

Le contrôle et la validation des prestations réalisées. Une attention particulière doit être portée sur :

- la conformité au contenu technique imposé par la réglementation,
- la conformité des études à la commande,
- la rigueur des méthodes employées et l'exposé des limites rencontrées dans celles-ci,
- la transversalité et l'objectivité des analyses produites,
- la lisibilité et la compréhension du dossier par le public,
- la pertinence de l'analyse des effets et des mesures.

1.2.3 La concertation sur le projet

Il convient de souligner l'intérêt fondamental d'une bonne concertation et d'une bonne information aux différents stades de projet :

- de nombreuses données utiles à la conception du projet et à l'approche environnementale sont détenues par les acteurs locaux (collectivités, milieux associatifs, etc.), avec lesquels il importe de nouer un dialogue constructif dès le stade de la collecte des données,
- certains aspects du projet peuvent nécessiter un accord d'instances locales (police de l'eau, police de la pêche, Architecte des Bâtiments de France, Commission des sites, etc.).

LA CONCERTATION PRÉALABLE AUX PROJETS DE TRAVAUX, D'AMÉNAGEMENT ET D'OUVRAGES DE L'ÉTAT ET DES COLLECTIVITÉS TERRITORIALES

Une circulaire du premier ministre en date du 5 octobre 2004 a rappelé l'intérêt et la nécessité d'une concertation préalable sur les projets avant leur présentation à l'enquête publique.

Pour les projets de l'État et de ses établissements publics, la concertation est théoriquement menée au niveau déconcentré, sous l'égide du préfet du département sur lequel se situe l'opération. Pour certains projets dont la déclaration d'utilité publique est prononcée par décret en Conseil d'État ou dont l'autorisation relève du niveau central, une concertation formalisée entre services de l'État est poursuivie à ce niveau. La concertation doit débuter en amont du processus d'élaboration du projet, suivant des modalités à définir en fonction de l'importance, de la complexité et des enjeux du projet. Elle peut se faire en deux temps :

- une phase de dialogue, entreprise dès l'identification du besoin et la définition du périmètre d'étude, qui permet de préciser les enjeux et sensibilités particulières,
- une phase de concertation plus formalisée, pendant l'élaboration du dossier d'enquête publique et la finalisation du dossier d'étude d'impact sur l'environnement.

Pour ces deux phases, une consultation des services de l'État est menée de façon séparée, en veillant à laisser des délais raisonnables pour un examen des documents transmis et la transmission d'informations ou d'avis. Il importe que le projet ait fait l'objet de tous les arbitrages nécessaires au sein des administrations de l'État avant d'être soumis à l'enquête publique. Une attention particulière doit être apportée à la concertation avec les services en charge de l'environnement, compte tenu de l'importance des enjeux de fond (maîtrise des impacts) et juridiques liés aux projets et à l'organisation des études correspondantes.

Pour les projets des collectivités, il est fortement recommandé de consulter les services de l'État dans le département où ceux-ci se situent, dans un souci de sécurité juridique et de maîtrise de délais des projets.

Le principe de concertation a depuis été renforcé par son introduction dans le Code de l'Environnement (article L.121-16) par la loi Grenelle II :
" A défaut de dispositions plus précises prévues [...] par les dispositions législatives particulières applicables au projet, la personne responsable d'un projet [...] peut procéder, à la demande le cas échéant de l'autorité compétente pour prendre la décision, à une concertation préalable à l'enquête publique associant le public pendant la durée d'élaboration du projet [...]."

Les études d'environnement constituent généralement un élément clef de la communication et de la concertation sur le projet, compte tenu des enjeux de fond et des intérêts des acteurs locaux. Elles sont donc généralement assez logiquement au cœur de la concertation locale, des procédures d'instruction administrative (concertation inter-services, enquête publique), voire des contentieux (sur le fond et/ou sur la forme).

1.2.4 La consultation du public

La consultation du public est un élément important pour la conduite générale et la conception du projet. Au-delà des procédures d'enquête publique instituées par les textes et répondant à un champ d'application très strict, le maître d'ouvrage peut également de sa propre initiative engager une consultation locale, sous différentes formes (réunions publiques, questionnaires, etc.). Ce dialogue avec le terrain est fondamental pour :

- bien identifier les sources de données pertinentes,
- bien appréhender les enjeux et sensibilités locales,
- recueillir les opinions sur les différentes options éventuellement envisagées,
- assurer une transparence sur la conduite du projet, puis sur les effets constatés.

LES ENOUÊTES PUBLIQUES

L'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique (DUP) régie par l'article L11-1 du code de l'expropriation, vise les opérations nécessitant la mise en œuvre de procédures d'expropriation.

La loi 83-630 du 12 juillet 1983 (dite loi Bouchardeau), désormais codifiée aux articles L123-1 et suivants du code de l'environnement, a étendu le champ d'application des enquêtes publiques, et créé un second type d'enquête publique qui concerne suivant leur nature et leur importance, les aménagements, ouvrages et travaux susceptibles d'affecter l'environnement, ainsi que les documents d'urbanisme.

LA DÉCLARATION DE PROJET

La loi 2002-276 du 27 février 2002 relative à la démocratie de proximité a par la suite modifié le régime de ces enquêtes publiques en soumettant le maître d'ouvrage public à une déclaration de projet sur l'intérêt général de l'opération. Cette déclaration de projet sur l'intérêt général de l'opération, à prendre par l'autorité de l'État ou l'organe délibérant de la collectivité territoriale responsable du projet, fait suite à la procédure d'enquête proprement dite.

La déclaration de projet mentionne l'objet de l'opération tel qu'il figure dans le dossier d'enquête, et comporte les motifs et considérations qui justifient son caractère d'intérêt général.

La déclaration de projet prend en considération l'étude d'impact, l'avis de l'autorité administrative de l'État compétente en matière d'environnement et le résultat de la consultation du public. Elle indique le cas échéant, la nature et les motifs des principales modifications qui, sans en altérer l'économie générale, sont apportées au projet au vu des résultats de l'enquête publique.

En l'absence de déclaration de projet, aucune autorisation de travaux ne peut être délivrée. Si la déclaration de projet n'est pas intervenue dans un délai d'un an à compter de la clôture de l'enquête, l'opération ne peut être réalisée sans nouvelle enquête.

Si les travaux n'ont pas reçu un commencement d'exécution dans un délai de cinq ans à compter de la publication de la déclaration de projet, la déclaration devient caduque. En l'absence de changement dans les circonstances de fait ou de droit, le délai de validité de la déclaration peut être prorogé une fois pour la même durée (5 ans) sans nouvelle enquête, par une déclaration de projet prise dans les mêmes formes que la déclaration initiale et intervenant avant l'expiration du délai de 5 ans (art. L126-1 du CE).

1.2.5 L'organisation environnementale des travaux

La phase chantier peut se révéler la plus critique en termes d'impacts environnementaux si les mesures préventives adéquates ne sont pas prises. Il importe d'intégrer dans le dossier de consultation des entreprises et dans les procédures de consultation (contenu et critères de choix des offres) des spécifications techniques précises sur le plan environnemental.

Le code des marchés publics intègre un certain nombre de dispositions en matière d'environnement et de développement durable.

LE CODE DES MARCHÉS PUBLICS ET L'ENVIRONNEMENT (EXTRAITS)

Article 5 : obligation pour le maître d'ouvrage de tenir compte des préoccupations de développement durable dans la définition des besoins,

Article 6 : possibilité pour le maître d'ouvrage de définir les exigences environnementales dans ses spécifications techniques (références aux écolabels attribués par des organismes indépendants),

Article 14 : possibilité pour le maître d'ouvrage d'intégrer des conditions d'exécution environnementales dans l'avis d'appel public à concurrence ou dans le règlement de la consultation,

Article 45 : possibilité pour le maître d'ouvrage d'examiner le savoir faire des candidats en matière de protection de l'environnement, au travers de l'appréciation de leurs capacités techniques,

Article 50 : possibilités de variantes, y compris sur le plan environnemental (sous réserve que des variantes aient été explicitement autorisées par le maître d'ouvrage dans le cadre de la consultation),

Article 53 : possibilités pour le maître d'ouvrage d'intégrer et de faire peser (hiérarchisation) le critère environnemental dans l'ensemble des critères de choix de l'offre.

Pour une bonne prise en compte de l'environnement, le dossier de consultation des entreprises devrait utilement intégrer un SOPAE⁽¹⁾ (Schéma Organisationnel du Plan d'Assurance Environnement), qui est alors approuvé par le maître d'ouvrage au même titre que les autres pièces du marché. Le SOPAE doit conduire l'entreprise à des engagements très clairs (moyens humains et matériels mobilisés, contrôles internes et externes entrepris, procédures en cas d'incident, performances environnementales, etc.), qui seront concrétisés dans son Plan d'Assurance Environnement ⁽²⁾ (PAE).

Pendant la phase de préparation des travaux, l'entreprise attributaire du marché élabore le PAE. Ce document décrit la sensibilité et les contraintes liées aux sites traversés par le chantier et énonce les moyens mis en œuvre concrètement par l'entreprise pour respecter les objectifs fixés par le maître d'ouvrage.

⁽¹⁾ On pourra aussi trouver l'appellation SOPRE (Schéma Organisationnel du Plan de Respect de l'Environnement)

⁽²⁾ Ou PRE : Plan de Respect de l'Environnement

Il est soumis à l'approbation du maître d'œuvre avant le démarrage des travaux. Le chargé de l'environnement du maître d'œuvre en assure le suivi et l'application.

L'entreprise désigne, dès la remise de son offre, un chargé de l'environnement, indépendant de la production, dont la présence sur le chantier permet d'assurer le respect des exigences environnementales.

1.3

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET MESURES D'INSERTION

1.3.1 Les impacts environnementaux 1

L'étude d'impact sur l'environnement doit comporter "une analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents du projet sur l'environnement, et en particulier sur la faune et la flore, les sites et paysages, le sol, l'eau, l'air, le climat, les milieux naturels et les équilibres biologiques, sur la protection des biens et du patrimoine culturel et, le cas échéant, sur la commodité du voisinage (bruits, vibrations, odeurs, émissions lumineuses) ou sur l'hygiène, la santé, la sécurité et la salubrité publique" (art. R122.3 CE).

Un effet direct traduit les conséquences immédiates du projet dans l'espace et dans le temps. Un effet indirect résulte d'une relation de cause à effet ayant à l'origine un effet direct. Un effet indirect peut concerner des territoires éloignés du projet, ou apparaître dans un délai plus ou moins long. Le tarissement d'un captage d'eaux souterraines du fait du drainage de cellesci par la présence du tunnel rentre par exemple dans cette catégorie.

Au-delà des notions d'effets directs et indirects, temporaires et permanents, on introduit parfois des notions complémentaires telles que les **effets induits** et les **effets cumulés** :

- effet induit : effet résultant d'une action d'aménagement rendue possible ou opportune par la réalisation du projet telle que le ré-aménagement du centre d'un village du fait de la déviation du trafic autorisée par un projet de tunnel;
- effet cumulé : effet résultant du cumul d'effets élémentaires tel que la gêne globale apportée aux riverains en phase chantier du fait du cumul des nuisances (modification des plans de circulation, circulation d'engins de chantier, envols de poussières, bruit et vibrations, etc.).

Remarque : le projet de réforme des études d'impact engagé actuellement vise à mieux intégrer les effets cumulés des projets relevant d'un même maître d'ouvrage.

1.3.2 Les mesures d'insertion

L'étude d'impact doit préciser : "les mesures envisagées par le maître d'ouvrage ou le pétitionnaire pour supprimer, réduire, et si possible compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement et la santé, ainsi que l'estimation des dépenses correspondantes" (art. R122.3 CE).

Au regard de la réglementation relative aux études d'impact, on distingue trois types de mesures que le maître d'ouvrage est tenu de mettre en œuvre en fonction des impacts prévisibles de son projet :

- les mesures d'évitement ou de suppression : mesures permettant d'éviter ou de supprimer un impact (par exemple, choix d'une saison adaptée pour éviter le dérangement de la faune pendant le chantier) ;
- les mesures de réduction: mesures permettant de réduire un impact qui n'a pu être supprimé, sur le lieu et au moment où il se produit (par exemple: réalisation d'ouvrages de régulation et de décantation des eaux issues du réseau de collecte de plateforme avant rejet au milieu récepteur);
- les mesures de compensation ou mesures compensatoires : mesures permettant de compenser (en dernier recours) les effets dommageables qui ne peuvent être supprimés ou réduits, par une contrepartie sur un domaine similaire, non nécessairement mise en œuvre au même endroit (par exemple, création d'une zone humide en remplacement d'une zone similaire située sous l'emprise du projet).

La définition puis la mise en œuvre concrète des mesures compensatoires supposent d'apprécier très en amont le montage juridique (maîtrise foncière en particulier), les modalités de financement (investissement et gestion) et la pérennité dans le temps de l'efficacité de la mesure (gestionnaire compétent, financement adapté et suivi).

Le maître d'ouvrage peut par ailleurs, au delà des obligations réglementaires, contribuer à la mise en œuvre d'actions d'accompagnement du projet conduites par d'autres acteurs (par exemple, aménagement d'une plate-forme et d'un itinéraire de découverte d'un site).

2. TASSEMENTS DES SOLS



Le creusement d'un tunnel provoque des mouvements qui peuvent entraîner des désordres plus ou moins importants dans l'environnement du tunnel.

La réponse du terrain au creusement dépend en premier lieu de la nature géologique et des caractéristiques géomécaniques du matériau encaissant, mais aussi des conditions hydrogéologiques, des méthodes d'exécution (excavation et soutènement) ainsi que de la profondeur et des dimensions de l'ouvrage. La nature, le mode de fondation et l'éloignement des constructions voisines sont à prendre en compte pour apprécier l'impact de l'ouvrage. Le contexte défavorable typique est le creusement d'un tunnel à faible profondeur en site urbain.

La réponse du terrain à l'excavation et la description des phénomènes conduisant à l'apparition de tassements en surface ont été abordés de façon exhaustive dans le document *Génie Civil du Dossier Pilote des tunnels [1].* Est abordée plus particulièrement ici la question de l'impact sur l'environnement et donc le risque de dommages liés à la vulnérabilité des structures avoisinantes. En ce sens, ce chapitre thématique est à rapprocher des "vibrations solidiennes" *(Cf. 3)* et "surpressions aériennes" *(Cf. 4)*, pour lesquelles se décline une démarche d'étude analogue.

La réalisation des tranchées couvertes se réfère à la problématique de chantier à l'air libre et n'est pas abordée.

CREUSEMENT DES TUNNELS ET TASSEMENTS

2.1.1 Mécanismes physiques liés au creusement d'un tunnel

Le creusement d'un tunnel implique une décompression des terrains au pourtour de l'excavation, qui se traduit par une modification de l'état de contrainte. Ce déconfinement engendre des mouvements en direction de l'excavation. Les pertes de volume initiées en souterrain (convergence des parois latérales et extrusion du front de taille) se répercutent dans le massif et provoquent une cuvette de tassement en surface : on parle de tassements immédiats générés simultanément à l'avancement du front. Cette cuvette présente un caractère tridimensionnel et évolutif du fait de l'avancement progressif du front. Généralement centrée sur l'axe de l'ouvrage, elle peut se désaxer du fait des hétérogénéités du terrain.

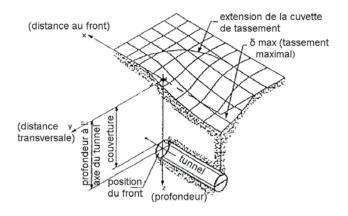


Illustration 1 : cuvette de tassement tridimensionnel (source : AFTES)

2.1.2 Terrain et méthodes de creusement

Le contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique du site est un élément essentiel déterminant la réponse du terrain à l'excavation. De ce point de vue, la maîtrise de la stabilité et des déplacements au front de taille est essentielle à la maîtrise des tassements de surface.

Les méthodes de creusement mécanisées au tunnelier sont de nature à satisfaire ces exigences en site urbain à faible profondeur. L'attention est cependant attirée sur le risque de création de fontis à l'avancement. Pour faire face à ce risque, une maîtrise parfaite du confinement est nécessaire. Des méthodes de creusement conventionnelles peuvent aussi

être définies avec ces objectifs de limitation des tassements. Cependant l'expérience montre que seules les interventions en souterrain à l'avant du front sont de nature à modifier l'équilibre final de l'ouvrage : une fois le front passé dans une section donnée, toute intervention en souterrain (renforcement du soutènement courant ou fermeture de la section par un revêtement rigide) est globalement insuffisante.

2.1.3 Phénomène de consolidation par rabattement de nappe

Le creusement d'un tunnel provoque aussi un drainage des terrains aquifères avec un rabattement de la nappe qui peut conduire à un phénomène de consolidation des sols (évolution temporelle liée à la dissipation des surpressions interstitielles): on parle alors de tassements différés dans le temps. Dans le cas des terrains perméables (colluvions, sables et graves), ces tassements de consolidation (dénoyage) sont généralement de faible amplitude et se produisent rapidement. Dans le cas des terrains peu perméables (argiles), les tassements de consolidation peuvent se poursuivre pendant plusieurs mois.

Les tunnels routiers sont aujourd'hui systématiquement étanchés en site urbain. En cas d'étanchéité totale, le rechargement des nappes après construction conduit généralement à un retour vers la situation d'équilibre antérieure, participant à stabiliser les déformations différées (hormis le fluage propre des terrains).

En phase d'exploitation, seule une modification de l'hydrogéologie du site peut conduire à l'apparition de tassements en surface.

IMPACTS ET ENJEUX LIÉS AUX TASSEMENTS DES SOLS

2.2.1 Zone d'influence géotechnique 2.2.2 Vulnérabilité du bâti

La zone d'influence géotechnique (ZIG, définie dans la norme NF P 94-500, [2]) est le volume de terrain au sein duquel il y a interaction entre l'ouvrage et l'environnement. La forme et l'extension de cette ZIG dans le cas des tunnels à faible profondeur est représentée schématiquement sur l'illustration 2. Les tassements immédiats dus au creusement proprement dit sont localisés au droit de l'ouvrage (typiquement dans une cuvette étendue de 50 à 100 m de part et d'autre de l'ouvrage).

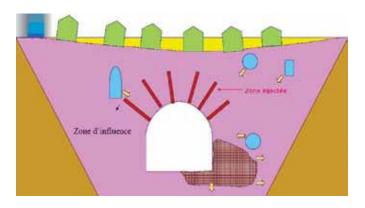


Illustration 2 : zone d'influence géotechnique (en rose) d'un tunnel à faible profondeur (source : CETU)

Les tassements différés (consolidation) provoquent un mouvement plus ou moins uniforme, sur une zone plus étendue correspondant à la zone de drainage.

Les impacts liés aux tassements consistent en l'apparition de dommages aux avoisinants, qui sont les bâtiments, ouvrages, réseaux, aménagements de terrain ou biens, situés dans la ZIG. Les recommandations du GT 16 de l'AFTES relatives aux "tassements liés au creusement des ouvrages en souterrain " [3] distinguent trois catégories de dommages :

- les dommages architecturaux, qui affectent l'apparence visuelle;
- les dommages fonctionnels, qui affectent l'usage (mauvais fonctionnement des portes et fenêtres, perte de verticalité des ascenseurs, etc.);
- les dommages structuraux, qui affectent la stabilité même du bâti.

D'un point de vue théorique, les ouvrages de surface sont sensibles essentiellement aux tassements différentiels entre appuis. L'apparition de tassements absolus importants, par exemple causés par le phénomène de consolidation, pose peu de problèmes aux structures. Cependant, en présence de tassements absolus de grande amplitude (de l'ordre du centimètre au décimètre), les hétérogénéités des terrains de couverture se manifestent par des tassements différentiels localisés.

DÉMARCHE D'ÉTUDE

La démarche d'étude propre aux thématiques Génie Civil (tassements, vibrations et surpressions) peut être découpée en cinq phases techniques. En complément, tout au long du projet, le maître d'ouvrage doit communiquer auprès des riverains sur les impacts prévisibles du chantier et les mesures prises en cours de creusement de l'ouvrage. A ce titre, c'est au maître d'ouvrage de fixer après concertation le niveau de dommage qui lui paraît acceptable.

Phases techniques successives		Phases d'études	Acteur responsable	
(1) détermination des effets	(2) état initial	(3) évaluation de la vulnérabilité	études amont	maître d'ouvrage
du creusement	(=) otal illicia	des constructions		maître d'ouvrage et maître
(4) détermination des seuils de pilotage contractuels et définition des auscultations		études de conception	d'œuvre	
(5) mise en œuvre des auscultations et description de la chaîne de décision		exécution	maître d'ouvrage, maître d'œuvre et entreprises	

Tableau 2 : démarche d'étude applicable aux thématiques génie civil d'un tunnel

La description des 5 phases techniques est la suivante :

(1) détermination des effets du creusement

Cette phase vise la détermination des cuvettes prévisibles de tassement en fonction des caractéristiques du terrain et des méthodes de creusement envisageables.

(2) état initial

Il consiste à dresser l'inventaire des structures avoisinantes potentiellement impactées par le creusement puis à préciser leur état initial et à établir un classement typologique des structures. Cette étape conduit à une première évaluation de leur capacité générale à accepter des déformations.

(3) évaluation de la vulnérabilité des constructions Cette phase comprend :

- l'évaluation des contraintes mécaniques subies par les constructions dans le champ de déplacement imposé par le creusement,
- la détermination des seuils d'admissibilité fixés en fonction des niveaux de dommages acceptés pour les constructions, indépendamment de l'estimation qui peut être faite des tassements attendus.

(4) détermination des seuils de pilotage contractuels et définition des auscultations

Deux seuils de pilotage contractuels sont généralement définis :

- un seuil d'alerte, seuil au-delà duquel une adaptation de la méthode est nécessaire,
- un seuil d'arrêt, seuil absolu qui ne doit pas être dépassé sous peine de mise en péril des constructions.

La **définition des auscultations** au droit des constructions à préserver permet de vérifier lors de la réalisation de l'ouvrage que les valeurs limites (tassements en surface, déplacements xyz du bâti, etc.) ne sont pas atteintes.

(5) mise en œuvre des auscultations et description de la chaîne de décision

La mise en œuvre des auscultations permet de connaître le comportement du terrain lors du creusement, de valider les méthodes d'estimation des tassements et d'adapter le soutènement au regard des seuils de pilotage en visant une réactivité suffisante des acteurs sur la base d'une chaîne de décision clairement définie.

L'articulation de ces phases techniques avec le déroulement du projet selon le schéma "études amont, études de conception et exécution" est décrite ci-après.

2.3.1 Au stade des études amont

L'état initial est à engager dès les études amont même s'il ne prend au départ que la forme d'une simple enquête. Si des précisions techniques quant à la définition exacte du projet manquent parfois, cet état initial pourra être affiné et actualisé au fil de l'avancement des études.

Couplés à la détermination des effets du creusement, les premiers éléments de l'état initial permettent d'avoir une première idée de la sollicitation que pourraient subir les constructions. Ces éléments donnent des indications sur la faisabilité du creusement et le choix de la méthode vis-à-vis de seuils issus de l'expérience sur des constructions similaires, dans l'attente d'études spécifiques menées au stade de la conception. Ils permettent aussi d'orienter le choix de la variante à privilégier.

A ce stade, les études, pour partielles qu'elles soient, doivent établir la faisabilité de l'ouvrage c'est-à-dire vérifier qu'il existe bien une méthode qui permettra de limiter les tassements à des valeurs acceptables et cela avec une marge de sécurité importante pour compenser le manque de données géotechniques et structurelles précises. Dans certains cas il peut s'avérer nécessaire d'approfondir les études de tassement dès la phase amont des études.

2.3.2 Au stade de la conception

La fixation des seuils de tassements admissibles en surface lors du creusement d'un tunnel est établie en parallèle du dimensionnement de l'ouvrage avec lequel elle interfère fréquemment. Les phases d'étude de conception doivent conduire à déterminer des seuils spécifiques pour chaque construction impactée par le projet (tout du moins par groupe de constructions sur la base du classement typologique évoqué dans la phase d'état des lieux initial).

Les seuils de pilotage qui en résultent et les principes d'adaptation des méthodes de creusement associés, déterminés au stade du projet, sont rendus contractuels au stade du marché.

A l'issue des études de conception persistent inévitablement des incertitudes sur la nature, les caractéristiques et le comportement des terrains traversés ainsi que sur le comportement précis des constructions. Si les méthodes de conception doivent intégrer le mieux possible les incertitudes identifiées, les risques résiduels doivent également faire l'objet d'un traitement particulier.

2.3.3 Au stade de l'exécution

La qualité des auscultations et la réactivité des acteurs sont autant de facteurs de réussite pour la préservation des constructions. Dans tous les cas, il est recommandé au maître d'ouvrage de réaliser un référé préventif.

Le contrat de travaux doit être rédigé de telle sorte que l'entreprise ait conscience et anticipe des risques résiduels afin d'être en mesure au stade des travaux, le cas échéant, d'adapter les méthodes de creusement et les auscultations.

LE RÉFÉRÉ PRÉVENTIF

Effectué avant le début des travaux, il correspond à un examen contradictoire mené en présence de toutes les parties concernées. Le maître d'ouvrage demande, en référé, la désignation d'un expert judiciaire, avec mission de :

- prendre connaissance des travaux envisagés ;
- disposer de la liste des entreprises qui exécuteront les travaux et de leurs polices d'assurance;
- visiter les lieux, les décrire, en précisant leur état (dégradations, vétusté, défaut d'entretien);
- · décrire l'état des sous-sols ;
- donner des éléments au tribunal pour pouvoir comparer l'état des immeubles avant et après les travaux;
- émettre des avis sur les éventuels risques de déstabilisation des existants et sur les mesures à prendre.

Lorsqu'il a fini ses constatations, l'expert rédige un rapport dans lequel sont consignées toutes ses observations. Ce rapport est remis à chaque partie et au tribunal. Lorsque des difficultés apparaissent en cours de chantier, il est généralement prévu dans la mission de l'expert qu'il revienne sur les lieux pour constater les éventuels dégâts, en rechercher les causes, faire des préconisations, chiffrer le coût des travaux de reprises ou des mesures à prendre et donner des éléments qui permettront au tribunal de statuer sur les éventuelles responsabilités.

2.4 MÉTHODES ET MOYENS D'ÉVALUATION

Les méthodes et outils disponibles sont présentés dans ce chapitre selon les phases techniques successives telles qu'elles sont définies au *chapitre 2.3.*

Le contenu de chacune de ces phases varie selon le stade d'avancement des études et selon les enjeux.

2.4.1 Détermination des effets du creusement

La description de la sollicitation appliquée aux structures avoisinantes consiste à évaluer les déplacements prévisibles du massif lors du creusement. On peut se référer notamment aux recommandations de l'AFTES [3] qui rappellent les méthodes utilisables. La section III du Dossier pilote des tunnels "Génie Civil" [1], indique pour sa part :

"Il existe un certain nombre de méthodes permettant d'estimer de manière simple les tassements à la surface du sol engendrés par le creusement d'un tunnel. Ces méthodes reposent souvent sur une démarche comportant les étapes suivantes :

- évaluation des pertes de volume générées par le creusement du tunnel (pertes dues à l'extrusion du front de taille, à la convergence des parois, à un mauvais remplissage du vide annulaire derrière la jupe d'un tunnelier);
- évaluation de la part de ces pertes se répercutant en surface (en cas de tunnel à faible profondeur, on fait généralement

l'hypothèse d'une transmission intégrale du volume perdu en surface) ;

- choix de la forme de la cuvette de tassement et détermination de sa largeur à partir des caractéristiques géométriques du tunnel (dimension, profondeur) et de la nature du terrain;
- calcul de la profondeur de cette cuvette pour retrouver en surface un volume égal à celui des pertes prises en compte."

Les données d'entrée concernent la géologie, la méthode de creusement-soutènement, la définition géométrique du projet (dimension de l'ouvrage, couverture). Les données de sortie concernent la description de la cuvette de tassement attendue :

- largeur (emprise des risques potentiels), profondeur (tassement absolu maximal) et pente (tassement différentiel maximal) transversalement à l'axe de l'ouvrage;
- courbe longitudinale théorique de tassement.

Les méthodes évoquées ci-dessus s'appliquent à la détermination des tassements dits "immédiats" générés simultanément à l'avancement du front (mais qui peuvent se répercuter en surface avec un certain étalement dans le temps). Ces méthodes, à caractère empirique ou semi-empirique, sont très utiles lors des phases d'études amont et donnent des ordres de grandeur que l'on peut ensuite confronter à des résultats de calculs plus sophistiqués des déplacements autour du tunnel, utilisant notamment la méthode des éléments finis, lors des phases d'études de conception.

Dans certains cas, des tassements différés peuvent apparaître bien après la fin des travaux, notamment dans les sols fins où des phénomènes de consolidation peuvent être engendrés par le creusement de l'ouvrage.

2.4.2 Analyse de l'état initial

L'analyse de l'état initial est fondée sur une phase de reconnaissances portant d'une part sur la caractérisation du contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique du site (cf. section II du Dossier pilote des tunnels "Génie Civil" [1]) et d'autre part sur le diagnostic des avoisinants (bâtiments et ouvrages dans la zone d'influence géotechnique du tunnel).

Ce deuxième point consiste en une collecte des renseignements sur le bâti et les réseaux sensibles, des documents d'archives et d'expertise techniques, accompagnée d'une campagne éventuelle de relevés topographiques.

La synthèse de ces informations conduit à adopter une classification typologique du bâti et des réseaux, en y associant si possible un découpage en zones homogènes intégrant également les informations géotechniques. Cette classification est basée sur les éléments suivants portant sur la structure à préserver :

- · nature et fonction,
- dimensions, matériaux et mode de conception (maçonnerie, béton armé, etc.),
- mode de fondation,
- âge et état présent (par une qualification des dommages préexistants),

et conduit à une première évaluation de la capacité générale des structures à accepter des déformations.

A titre d'exemple, le tableau suivant présente le classement typologique établi pour le creusement du second tube du tunnel de Toulon.

Nature et fonction	Structure du bâtiment	État du bâtiment
1 – bâtiment recevant essentiellement du public ou abritant une activité importante	A – maçonnerie de pierres ou de moellons et planchers bois ou métal	1 – bâtiment ne présentant aucun désordre structurel
2 – bâtiment à usage essentiellement d'habitation	B – béton armé et maçonnerie moderne à forte inertie	2 – bâtiment présentant quelques désordres structurels
3 – bâtiment à usage artisanal ou industriel	C – béton armé et maçonnerie moderne à faible inertie	3 – bâtiments présentant des désordres structurels importants

Tableau 3 : exemple de classement typologique des constructions ; un bâtiment public en béton armé ne présentant aucun désordre est classifié 1B1

L'enquête aboutit au final à la détermination :

- de l'état de référence des structures synthétisé par des fiches signalétiques,
- de quelques pistes concernant une ou des solutions techniques adaptées et les risques associés.

Cet état des lieux initial est différent du référé préventif (*Cf. encadré du chapitre 2.3.3*) à conduire par le maître d'ouvrage préalablement aux travaux.

2.4.3 Évaluation de la vulnérabilité des constructions

2.4.3.1 Évaluation des contraintes mécaniques subies par les constructions

La détermination de la réponse des structures à la sollicitation engendrée par les mouvements du terrain dus au creusement d'un tunnel consiste à évaluer les déplacements ainsi que les contraintes attendues dans la structure lorsqu'elle est placée dans le champ de déplacement imposé au niveau de ses fondations.

Plusieurs approches peuvent être envisagées :

- approches analytiques sur des configurations simplifiées ;
- approches numériques du type "éléments finis", chaque fois que le risque est important et que les résultats de l'approche simplifiée paraissent insuffisants notamment au regard d'observations sur des cas similaires.

Il est par ailleurs nécessaire de mener une étude de sensibilité :

- sur la forme et la profondeur de la cuvette, qui dépendent des paramètres géotechniques, de la pression de confinement lors du creusement au tunnelier et des profils-types de creusement-soutènement en méthode conventionnelle;
- sur la position de la cuvette vis-à-vis de la construction (influence de la géologie sur la cuvette théorique).

Cette phase permet, à partir des données d'entrée (cuvette de tassements, état de référence du bâti), d'obtenir une qualification de l'impact des travaux envisagés par la détermination des déplacements et contraintes mécaniques attendus de la structure.

Les phases de modélisation sont généralement découplées mais il peut être nécessaire, dans les cas complexes, de prendre en compte l'interaction sol-structure (influence de la rigidité de la structure sur les déplacements imposés).

2.4.3.2 Détermination des seuils d'admissibilité

Un seuil d'admissibilité correspond à un état limite de sollicitations d'une structure au-delà duquel un des critères de performance auxquels elle doit répondre n'est plus satisfait. On distingue :

- les états-limites de service (ELS) qui correspondent à un état de sollicitation à partir duquel une des fonctions de la structure n'est plus satisfaite. En deçà de l'ELS, on parle de dommages architecturaux et au-delà de dommages fonctionnels.
- les états-limites ultimes (ELU) qui correspondent à un état de sollicitation dont le dépassement affecte la structure elle-même. Au-delà de l'ELU, on parle de dommages structuraux.

Par exemple, l'AFTES [3] propose une qualification des dommages pour le cas des maçonneries basée sur la fissuration observée. Pour d'autres types de structures, ces valeurs ne sont pas adaptées.

2.4.4 Détermination des seuils de pilotage contractuels et définition des auscultations

2.4.4.1 Détermination des seuils de pilotage contractuels

Compte tenu de l'état de référence des constructions et de leur seuil d'admissibilité, on quantifie les déplacements acceptables au niveau de leur fondation.

Les seuils contractuels de pilotage sont déterminés à partir de ces déplacements acceptables moyennant une marge de sécurité. Ils se caractérisent par des tassements absolus et des tassements différentiels, qui s'appliquent à l'ensemble du projet ou varient en fonction de tronçons ou zones géographiques.

Pour mémoire, deux seuils contractuels de pilotage sont couramment identifiés (*Cf. 2.3*):

- un seuil d'alerte,
- un seuil d'arrêt.

Le pilotage au fil du creusement s'appuie sur les prévisions des tassements totaux (à l'arrière du front). Ces prévisions sont établies à partir des données mesurées très tôt à l'avant du front et extrapolées à l'arrière du front sur la base des courbes longitudinales théoriques de tassement. Ces prévisions sont comparées aux seuils contractuels afin de décider de renforcer ou d'alléger les pré-soutènements ou le confinement et éventuellement d'adapter la vitesse de progression du creusement.

Cette méthode de pilotage exige une grande réactivité de la part de tous les acteurs (entreprises et maître d'œuvre en particulier) qui doivent en permanence anticiper les tassements attendus et en tirer rapidement les conséquences opérationnelles. En l'absence d'une telle garantie de réactivité, la marge de sécurité à considérer doit être plus importante.

2.4.4.2 Définition des auscultations

Le suivi du creusement nécessite classiquement le recours à une auscultation en souterrain pour :

- évaluer la sécurité immédiate : connaissance de l'état de stabilité de l'excavation.
- vérifier le soutènement : vérification de la bonne adéquation du soutènement aux exigences de la déformation prévue et éventuelles adaptations,
- déterminer le comportement réel du terrain : appréhension du comportement réel du massif autour de l'excavation,
- améliorer les prédictions : calage du modèle retenu lors du projet.

En particulier, le suivi du creusement en souterrain permet d'évaluer les premiers mouvements (convergence en paroi et extrusion du front de taille) à l'origine de désordres potentiels en surface. Pour en savoir plus sur les différents moyens de mesure et les méthodes d'exploitation, on peut se référer à la section IV "auscultation pendant les travaux " du Dossier pilote des tunnels "Génie Civil" [1].

En parallèle au suivi en souterrain du creusement, il est nécessaire d'effectuer :

- des mesures des tassements verticaux en surface : en champ libre, ces mesures sont représentatives de la cuvette de tassements ;
- des auscultations des constructions sensibles : évaluation des déplacements dans les trois directions de l'espace ;
- des auscultations des ouvrages souterrains voisins : convergence, nivellement, suivi des fissures ;
- un suivi piézométrique du site.

Les méthodes couramment utilisées font appel à des mesures topographiques à l'aide de théodolites automatisés. Pour le suivi des constructions, on peut aussi utiliser des tilt-mètres sur les parois verticales des bâtiments (renversement), des fissuromètres, des électronivelles, etc.

La définition des auscultations doit respecter plusieurs règles fondamentales :

- établir le comportement du site avant travaux : mouvements de terrains préexistants, cycles journaliers liés à la température, au trafic, etc.
- couvrir l'ensemble de la surface des cuvettes estimées avec une densité suffisante pour obtenir les formes transversale et longitudinale des cuvettes,
- veiller à la complémentarité des mesures de suivi du bâti et de surface,
- choisir une périodicité des mesures adaptée à la sensibilité des constructions et à l'avancement du chantier.

Le tableau suivant donne en exemple des classes de bâti identifiées permettant de définir le niveau de suivi à prévoir.

Classement	Définition des actions à prévoir
classe 0	immeubles et bâtis pour lesquels le diagnostic et les informations acquises ne permettent pas encore d'estimer le risque : poursuivre les investigations permettant le passage dans une classe de 1 à 3
classe 1	immeubles et bâtis pour lesquels il est estimé que le risque est faible : pas d'action particulière définie à l'exception d'un examen visuel régulier
classe 2	immeubles et bâtis nécessitant la mise en place d'un système de suivi : définition d'une instrumentation spécifique
classe 3	immeubles et bâtis nécessitant la réalisation de travaux de confortement préalable : définition et estimation des travaux de confortement et définition d'instrumentation spécifique

Tableau 4 : exemple de classement des constructions en vue de la définition des auscultations



Illustration 3 : représentation cartographique des constructions lors du creusement du tunnel de Toulon. La coloration des étiquettes indique l'état des bâtiments (selon modèle de la colonne 3 du tableau 3) tandis que la classification est représentée par la coloration de la surface bâtie (selon modèle du tableau 4). En violet, sont représentés les points d'auscultation.

2.4.5 Mise en œuvre des auscultations et description de la chaîne de décision

Il est recommandé que les auscultations soient réalisées dans le cadre du même marché que celui des travaux souterrains. Le responsable des travaux est ainsi également responsable des auscultations. Il dispose en permanence des éléments pour piloter son chantier.

Il est par ailleurs utile de veiller à ce que l'entreprise qui réalise le chantier dispose d'une chaîne de décision clairement établie vis-à-vis de la problématique tassement. En particulier, des seuils intermédiaires et complémentaires aux seuils contractuels de pilotage peuvent être définis par l'entreprise pour avoir une action graduée avec des acteurs identifiés.

2.5

MESURES DE RÉDUCTION DES IMPACTS

Le phénomène de tassement est irréversible, les déformations qui se produisent lors du creusement sont définitives. Les mesures retenues pour limiter les impacts sur les constructions visent à réduire l'amplitude du phénomène ou la vulnérabilité des constructions.

C'est au stade des études de conception que ces mesures de réduction doivent être recherchées :

- pour la limitation des tassements immédiats, dans le choix des méthodes de creusement,
- pour la limitation des tassements différés, par des méthodes de réduction de la perméabilité des terrains.

2.5.1 Tassements immédiats

Globalement le creusement au tunnelier permet de mieux maîtriser le phénomène de tassement que les méthodes conventionnelles.

En site sensible, les tunneliers utilisés sont nécessairement à front confiné. Les principales mesures de réduction des tassements sont :

- un pilotage de qualité par la maîtrise de la pression de confinement au front et des volumes excavés,
- la définition d'une sur-excavation adaptée au comportement attendu du terrain (conicité de la jupe) et le traitement de cette sur-excavation (qualité des injections derrière les voussoirs).

Pour la limitation des tassements en site urbain, l'emploi de méthodes de creusement conventionnelles reste possible moyennant des précautions dans la définition des profils types de creusement-soutènement :

- phasage d'excavation de la section (pleine section ou section divisée),
- pose de soutènements rigides au plus près du front en voûte et en radier,
- mise en œuvre de pré-soutènements au pourtour de l'excavation (voûte parapluie à l'avant du front) et de confinement du front par boulonnage long.

Le pilotage du chantier doit permettre l'adaptation des profils types au comportement observé.

Quelle que soit la méthode retenue, il est également possible de réduire les tassements par traitement des terrains à l'avant du front pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et/ou réduire sa perméabilité (injections, jet-grouting ou congélation). L'effet des injections sur l'environnement n'est pas nul et peut conduire à une modification durable des paramètres physicochimiques des eaux souterraines en lien avec les sols traités (*Cf. recommandations de l'AFTES concernant les injections [4]*). En dépit des mesures précitées, les tassements peuvent rester importants et nécessiter la mise en œuvre d'injections de compensation. Il s'agit de compenser en temps réel les tassements pendant le creusement. Ces techniques délicates et difficiles à maîtriser restent réservées à certains contextes géologiques.

Par ailleurs, lorsque le seuil d'admissibilité des constructions est insuffisant, les constructions concernées peuvent être renforcées. Cette opération délicate nécessite une bonne connaissance de leur fonctionnement structurel.

2.5.2 Tassements différés

La limitation des tassements différés est obtenue par des injections d'étanchement des terrains. Ces injections doivent être réalisées avant l'excavation, soit depuis la surface soit depuis le tunnel en cours de creusement (*Cf. recommandations de l'AFTES concernant les injections* [4])

2.6

DISPOSITIONS RÉGLEMENTAIRES RELATIVES AUX TASSEMENTS ADMISSIBLES

Du point de vue strictement réglementaire, il n'existe pas de texte spécifique visant les tassements.

Toutefois, à titre informatif, certains textes abordent la question des valeurs limites des déformations des structures et des mouvements des fondations :

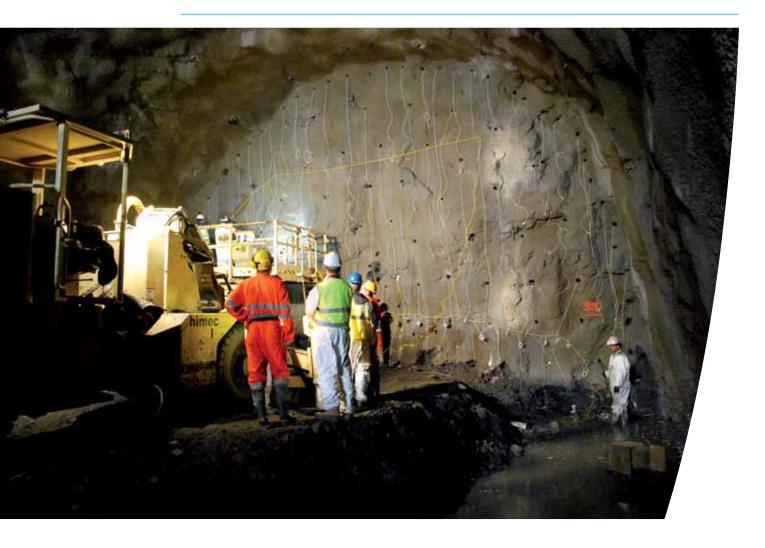
- annexe informative de l'Eurocode 7 : annexe H "Valeurs limites des déformations des structures et des mouvements des fondations" [5];
- norme belge NBN B 03-003 "Déformations des structures
- Valeurs limites de déformation Bâtiments" [6].

Les valeurs présentées dans ces textes sont des seuils issus de l'expérience sur des constructions similaires. Ils sont utilisés au stade des études amont pour avoir une première estimation de la capacité générale des constructions à accepter des déformations. Au stade des études de conception, une étude spécifique est nécessaire.

2.7 QUELQUES RÉFÉRENCES UTILES

- [1] Dossier pilote des tunnels "Génie Civil" / CETU / 1998.
- [2] Norme NF P 94-500, missions d'ingénierie géotechnique : classifications et spécifications / décembre 2006.
- [3] Tassements liés au creusement des ouvrages en souterrain, (Tunnels et Ouvrages Souterrains n° 132) / recommandation de l'Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES)/1995.
- [4] La conception et la réalisation des travaux d'injection des sols et des roches, (Tunnels et Ouvrages Souterrains n° 194-195)/ recommandation de l'Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES) / 2006.
- [5] Norme NF EN 1997-1, Eurocode 7 : Calcul géotechnique" Partie 1 : "règles générales et annexe H "Valeurs limites des déformations des structures et des mouvements des fondations"/ juin 2005.
- [6] Norme belge NBN B 03-003, déformation des structures, valeurs limites de déformation bâtiments / 2002.

3. VIBRATIONS SOLIDIENNES



Le terme "vibrations solidiennes" désigne les vibrations ayant pour origine les ondes se propageant dans le sol. Elles se distinguent en particulier des ondes aériennes, transmises par l'air, étudiées au chapitre thématique suivant.

En phase exploitation, les vibrations sont seulement liées à la circulation des véhicules et au fonctionnement des équipements du tunnel tels que les ventilateurs ou les pompes, pour des valeurs bien souvent insignifiantes.

En phase travaux, les vibrations solidiennes ont pour origine les tirs de mines ou l'utilisation d'engins mécaniques.

Dans ce document, seules ces vibrations sont abordées et plus particulièrement le cas d'un tunnel creusé à l'explosif, sachant que les études restent comparables quelles que soient les méthodes de creusement envisagées (brise-roche, machine à attaque ponctuelle, compacteur dynamique, vibrofonçage, tunnelier, etc.).

Le cas de la construction de tranchées couvertes n'est pas traité car il se rapproche d'un chantier à l'air libre.

CREUSEMENT DES TUNNELS ET VIBRATIONS SOLIDIENNES

Les diverses méthodes d'excavation en souterrain induisent des vibrations solidiennes plus ou moins marquées. L'excavation à l'explosif génère pour chaque pas d'avancement des vibrations sur un temps très court (quelques secondes). L'utilisation d'engins mécaniques à attaque ponctuelle ou de tunneliers entraîne des vibrations d'amplitudes plus faibles mais continues dans le temps induisant un risque de "fatique" des structures.

Globalement, c'est le creusement des tunnels à l'explosif qui nécessite le plus de vigilance vis-à-vis de cette problématique des vibrations solidiennes. Le recours à cette méthode de creusement doit donc s'apprécier d'une part au regard des contraintes techniques et d'autre part au regard des contraintes environnementales.

Par rapport au tir aérien, l'utilisation d'explosif en tunnel présente une difficulté du fait du confinement du terrain à excaver. La seule issue pour l'excavation se situe au niveau du front de taille. Pour cela, les plans de tir définissent plusieurs zones au sein de ce front pour permettre le dégagement de matériaux.

Ces zones, représentées sur la photo 1, sont usuellement appelées :

- bouchon : il intervient en premier dans l'ordre du tir et facilite l'expulsion de la roche en créant une cavité permettant ensuite le dégagement des autres zones ;
- abattage : il désigne le terrain à excaver autour du bouchon ;
- découpage et relevage : ils désignent le contour de la section à excaver.

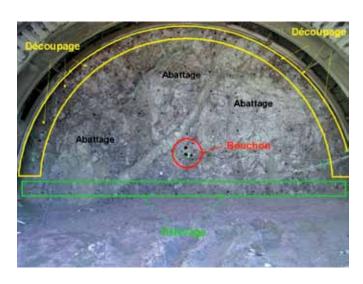


Photo 1 : repérage des différentes zones du plan de tir au tunnel du Lioran (source : LRPC de Clermont-Ferrand)

Les plans de tir précisent par zone précitée les quantités d'explosif, leur emplacement et le temps de départ de chaque détonateur.

Une partie de l'énergie explosive utilisée pour fragmenter et abattre la matrice rocheuse se propage et se dissipe dans l'environnement sous forme d'ondes vibratoires solidiennes et aériennes (*Cf. chapitre 4*) qui s'amortissent avec la distance.

1.2 IMPACTS ET ENJEUX LIÉS AUX VIBRATIONS SOLIDIENNES

Les impacts liés aux vibrations sont :

- les dommages aux constructions : sont concernés les bâtiments mais aussi les ouvrages de génie civil plus spécifiques ou bien même le milieu naturel au travers des cavernes ou des falaises,
- les dommages aux équipements sensibles ou la perturbation de leur fonctionnement (matériel informatique, appareils de mesure, chaîne de fabrication, etc.),
- · la gêne occasionnée aux personnes exposées.

Ces impacts sont identiques à ceux provoqués par les surpressions aériennes. La différence réside dans le mode de sollicitation des constructions, le point d'entrée des vibrations étant ici les fondations.

Par ailleurs, parmi les constructions pouvant subir des dommages se trouve l'ouvrage lui-même. Des travaux sur un ouvrage existant (doublement de tunnel, creusement de galeries ou de niches de sécurité, etc.) impliquent donc une certaine vigilance (risque de chute de blocs de maçonnerie par exemple dans le tube voisin qui est sous circulation). Les vibrations peuvent aussi perturber la prise du béton frais sur les chantiers.

La grandeur vibratoire à évaluer, qui est comparée aux limites contractuelles, dépend de la structure à étudier, par exemple :

- la vitesse pour un bâtiment,
- le déplacement pour un tablier de pont,
- l'accélération pour du matériel informatique.

La grandeur de base généralement utilisée reste toutefois la vitesse v à partir de laquelle il est possible de déterminer l'accélération ou le déplacement respectivement par différenciation ou intégration. La vitesse v est obtenue :

- soit par la mesure directe à l'aide d'un capteur de vitesse,
- soit par intégration du signal provenant d'un accéléromètre.

Le *tableau 5* donne des valeurs indicatives de seuils de vitesse de vibration constatés en pratique dans le domaine des travaux publics en fonction des types de constructions à préserver. Il s'agit de valeurs proposées par le Comité Français pour les Techniques Routières dans son guide *Terrassements* à *l'explosif*

dans les travaux routiers [7]. Ce document précise que "ces valeurs, relatives à des signaux non filtrés, s'appliquent sur la voie contenant la vitesse maximale et non sur la résultante des trois. Le choix d'une valeur, au sein de ces fourchettes qui demeurent très larges, dépend :

- des fréquences des vibrations qui ne peuvent être connues qu'à l'issue d'une mesure. Les seuils doivent être d'autant plus sévères que les fréquences sont basses,
- de l'état de la structure à préserver et de son comportement constaté à l'issue d'une mesure,
- des exigences de fonctionnalité de la structure à préserver dont l'appréciation relève de son gestionnaire."

Structures à préserver	Seuils constatés dans la pratique (mm/s)
habitations, constructions en maçonnerie traditionnelle	2 à 15 avec une valeur courante de 10
monuments historiques, structures dégradées	1 à 10 avec une valeur courante de 5
ouvrages en béton armé (hors béton frais), murs de soutènement, structures métalliques, pylônes	15 à 70
ouvrages enterrés hors prescriptions particulières du gestionnaire	20 à 100
ouvrages relevant d'un gestionnaire ayant des prescriptions propres (SNCF, EDF, GDF, etc.)	à définir avec le service gestionnaire
matériels sensibles (électronique, informatique, automatisme, alarmes, etc.)	à définir en fonction des prescriptions des fabricants
blocs instables	à définir dans le cadre d'une étude spécifique de stabilité

Tableau 5 : seuils de vibrations admissibles selon les récepteurs (source : Terrassements à l'explosif dans les travaux routiers / Guide technique CFTR / janvier 2002)

DÉMARCHE D'ÉTUDE

La démarche reprend le même cheminement que pour l'étude des tassements (*Cf. 2.3*), la sollicitation des constructions ayant ici pour origine les vibrations :

- (1) détermination des effets du creusement,
- (2) état initial,
- (3) évaluation de la vulnérabilité des constructions,
- (4) détermination des seuils de pilotage contractuels et définition des auscultations,
- (5) mise en œuvre des auscultations et description de la chaîne de décision.

Les paragraphes suivants précisent les spécificités relatives aux vibrations dans le déroulement des études.

3.3.1 Au stade des études amont

Au stade des études amont, il s'agit d'apprécier la sensibilité du site pour orienter le choix de la variante de tracé à retenir ainsi que la méthode de creusement, ce qui peut aussi conduire à retenir ou non l'option "creusement à l'explosif".

Cette appréciation repose sur l'analyse de l'état initial (2) (*Cf. chapitre 3.4.1*) au regard des effets attendus du creusement (1) ainsi que sur les données géologiques, les reconnaissances de terrain et l'identification des récepteurs sensibles aux vibrations.

3.3.2 Au stade de la conception

La détermination plus précise des effets du creusement (1) repose sur la détermination d'une loi d'amortissement pour évaluer la propagation des vibrations dans le terrain. Cette étude s'appuie sur des essais de tirs (*Cf. chapitre 3.4.2*).

Les essais de tirs permettent par ailleurs l'analyse de la **réponse des constructions (3)** à une sollicitation de type impulsionnelle.

Les seuils de vibrations admissibles (3) par une structure doivent également être définis ou fixés impérativement au stade des études de conception, indépendamment de ce qui précède. Cette détermination des seuils admissibles est suivie de la définition des auscultations (4) nécessaires au droit des constructions à préserver pour vérifier lors de la réalisation de l'ouvrage que les valeurs limites de vibrations ne sont pas atteintes.

Les **seuils de pilotage (4)**, qui sont déduits des seuils admissibles, conduisent à la définition des charges maximales à mettre en œuvre pour concevoir les plans de tir.

L'ensemble des éléments de l'étude de vibrations et en particulier :

- la loi d'amortissement du site déterminée par des essais de tir.
- le recensement, la localisation et la description des constructions et des zones sensibles aux vibrations situées dans le voisinage du chantier,
- les seuils de pilotage,

sont des éléments sous la responsabilité du maître d'ouvrage, qui doivent figurer dans les pièces du marché.

3.3.3 Au stade de l'exécution

L'étude de vibrations peut être complétée en tout début de chantier par la vérification de la loi d'amortissement par la réalisation de tirs en condition réelle, dits tirs expérimentaux. Comme pour les tassements, il est recommandé au maître d'ouvrage de réaliser un référé préventif.

En cours de chantier, le pilotage consiste à adapter le plan de tir en fonction des observations géologiques et des résultats des auscultations.

3.4

MÉTHODES ET MOYENS D'ÉVALUATION

3.4.1 Analyse de l'état initial

L'analyse de l'état initial est fondée sur les mêmes principes que pour la thématique "tassement".

En particulier, il est nécessaire d'identifier les principales constructions sensibles aux vibrations. Les constructions les plus couramment concernées sont les habitations individuelles ou collectives, les bâtiments industriels, les ponts et viaducs, les galeries techniques et ouvrages d'assainissement, les tunnels routiers ou ferroviaires. Les sites naturels sont également concernés (falaises, cavernes, etc.)

Les équipements situés à l'intérieur de ces bâtiments ou installations doivent être également pris en considération.

Les risques étant liés directement à la proximité, l'expérience montre qu'il convient de faire un inventaire dans une bande de 200 m minimum autour de l'axe du projet. Au-delà de cette distance, sauf configuration exceptionnelle, les amplitudes des vibrations sont généralement très faibles.

3.4.2 Détermination des effets du creusement par des essais de tirs

L'annexe 4.7 de la section 4 du dossier pilote Génie civil : "Étude et contrôle des ébranlements liés à l'utilisation des explosifs" [1] précise les grands principes relatifs aux essais de tirs. Il y est fait référence à plusieurs reprises dans ce chapitre.

"L'objectif essentiel des essais de tirs en forage est l'établissement d'une loi d'amortissement des vibrations en fonction de la distance, celui des tirs expérimentaux est de s'assurer de la faisabilité des dispositions techniques envisagées en testant en vraie grandeur un plan de tir réel [...]dans le site donné." [1]

"L'essai de tir consiste à faire exploser dans des forages des charges d'explosif de valeur croissante et disposées à différents niveaux. Les vitesses de vibrations engendrées par ces explosifs de mines bloquées sont enregistrées en différents points de l'environnement sensible à des distances croissantes. L'analyse des enregistrements permet d'établir une loi d'amortissement de la vitesse de vibration..." [1]

Pour caractériser la transmission des vibrations depuis la source jusqu'au point d'auscultation, on recherche cette loi d'amortissement de la vitesse en fonction de la distance tircapteur pondérée par la charge unitaire instantanée sous la forme générale :

$V = K (D/Q^{1/2})^{-\alpha}$ avec :

- V vitesse particulaire en mm/s,
- K constante ou coefficient de site,
- \bullet α pente de la droite de régression dans un diagramme log-log,
- D distance tir-capteur (en m),
- Q quantité d'explosif par numéro d'amorces (en g).

Une mise à jour continue de cette loi est nécessaire pour prendre en compte l'ensemble des mesures disponibles et permettre d'évaluer la dispersion des résultats, inévitable compte tenu du grand nombre de paramètres dont dépend l'émission des vibrations, leur transmission dans le terrain et leur réception au point d'auscultation.

Afin de permettre une comparaison objective des résultats (par tir, par capteur), on convient de rechercher une loi de type $Chapot\ [8]$ où le coefficient α est fixé à 1,8 ce qui conduit généralement à K compris entre 3 et 12. Cette simplification appelle une certaine vigilance car elle n'est pas adaptée dans tous les cas. La comparaison du niveau de vibrations induit porte alors uniquement sur le coefficient de site K.

On distingue:

- la loi moyenne (K_{moy} , α =1,8) qui traduit globalement la propagation des vibrations au sein du massif ;
- la loi maximale (K_{max} , α =1,8) qui traduit la dispersion des mesures autour de la loi moyenne précédente.

Du point de vue du respect des seuils de vibrations et afin de se placer du côté de la sécurité, il convient de retenir la loi maximale pour déterminer les charges admissibles d'un tir donné, compte tenu de l'éloignement des structures à préserver.

"Pour les moyens de terrassement mécanique autres que l'explosif, il n'est pas d'usage de réaliser des essais préalables, car ces matériels résultent bien souvent d'un choix de l'entreprise chargée de la réalisation des travaux. On peut cependant se référer à des courbes d'amortissement simplifiées (Cf. illustration 4), qui mettent bien en évidence les distances critiques des principaux matériels." [1]

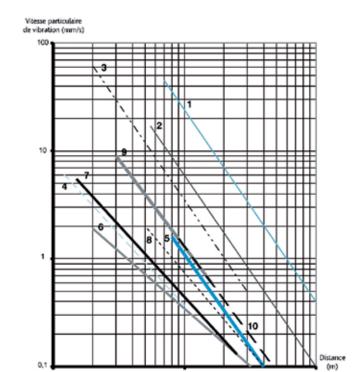




Illustration 4 : ordre de grandeur des vibrations émises par les matériels de travaux publics (source : dossier pilote des tunnels, génie civil, procédés de creusement et de soutènement/CETU)

3.4.3 Évaluation de la vulnérabilité des constructions

"Les seuils d'admissibilité dépendent à la fois du type de la sollicitation (impulsionnelle s'il s'agit de tirs à l'explosif, continue dans le cas de creusement mécanisé), des caractéristiques de la structure (matériaux constitutifs, état de vétusté, type de fondation), de la qualité du massif de fondation et de l'usage de la structure.[...]

En première analyse, on peut s'inspirer des recommandations de l'AFTES [9] qui intéressent essentiellement les constructions courantes à usage d'habitation :

- v < 10 mm/s, faible probabilité de dommages,
- 10 mm/s < v < 30 mm/s, nécessité d'un bon contrôle et probabilité accrue de réclamations,
- v > 30 mm/s, non recommandé en zone habitée".[1]

3.4.4 Détermination des seuils contractuels de pilotage et définition des auscultations

3.4.4.1 Détermination des seuils contractuels

Le pilotage consiste à adapter en cours de chantier les méthodes de creusement ou les plans de tir en cas de dépassement des seuils. Pour mémoire, deux seuils contractuels de pilotage sont couramment identifiés (*Cf. 2.3*):

- un seuil d'alerte.
- un seuil d'arrêt.

Dans le cas des vibrations, on parle aussi de seuils de contrôle qui en pratique sont légèrement inférieurs aux seuils de vibrations admissibles vis-à-vis des constructions.

La loi d'amortissement permet de déterminer le choix des charges unitaires possibles dans les plans de tir pour respecter les seuils établis.

Pour les moyens de terrassement mécanique autres que l'explosif, les seuils maximaux admissibles sont généralement plus faibles pour tenir compte du caractère continu de l'oscillation ou du caractère répétitif de l'impulsion qui accroît la probabilité de dommages. Les études conduisent alors à définir les spécifications des matériels utilisés (généralement en valeur de puissance) ou à définir des distances minimales d'utilisation pour un matériel de caractéristiques données.

3.4.4.2 Définition des auscultations

Le suivi du creusement nécessite classiquement le recours à une chaîne de mesurage mise en place sur le terrain pour :

- s'assurer qu'à tout instant les critères de vibrations sont respectés et que les travaux sont exécutés en toute sécurité vis-à-vis de l'environnement,
- affiner les prévisions en actualisant la loi d'amortissement si nécessaire.

Une chaîne de mesurage mise en place sur le terrain comprend des capteurs scellés sur les sites sensibles, reliés à un appareil avec enregistrement ou visualisation directe des résultats.

L'instrumentation doit être adaptée aux récepteurs selon leur degré de sensibilité. Les données de vibrations sont recueillies dans les trois directions de l'espace.

Pour satisfaire ces exigences, un plan de contrôle spécifiant l'instrumentation nécessaire ainsi que l'implantation des points de mesures est établi. Il consiste à disposer des capteurs de vibrations de préférence à la base des fondations de constructions sensibles préalablement choisies. Ce choix peut s'appuyer sur les constats contradictoires de l'état des constructions avoisinantes effectués en préalable au démarrage des travaux ou sur la présence d'équipements ou d'activités sensibles.

3.4.5 Mise en œuvre des auscultations et description de la chaîne de décision

Au même titre que pour les tassements, il est recommandé que les auscultations soient réalisées dans le cadre du même marché que celui des travaux. Le responsable des travaux est ainsi également responsable des auscultations. Il dispose en permanence des éléments pour piloter son chantier.

Les décisions à prendre en cours de chantier concernent essentiellement les adaptations des plans tirs et, le cas échéant, l'actualisation de la loi d'amortissement.

3.5 MESURES DE RÉDUCTION DES IMPACTS

Au même titre que pour les surpressions aériennes ou les tassements, une démarche d'information et d'explication préalable auprès des riverains est indispensable.

Des mesures concrètes sur le chantier permettent de diminuer les niveaux de vibrations. Les principales mesures envisageables sont :

- dans le cas d'un travail à l'explosif : la révision du plan de tir dans tous ses aspects
 - > chronologie de départ des charges,
 - > temps entre charges,
 - > valeur des charges,
 - > type de foration, etc.

 dans le cas de l'utilisation d'engins mécaniques : l'accommodation du temps et du type de travail (durée de la période, adaptation de la puissance...).

Au-delà de la réduction des vibrations à la source, la limitation de la gêne des riverains peut passer par un phasage adapté des travaux (sens d'attaque du creusement, etc.) et la fixation de créneaux horaires dépendant de l'activité des riverains. La définition d'horaires de tir fixes peut s'appliquer en présence d'équipements ou d'activités sensibles.

Enfin, à proximité d'un ouvrage souterrain en exploitation, des mesures spécifiques peuvent être prises comme l'interruption temporaire de la circulation.

DISPOSITIONS RÉGLEMENTAIRES OU NORMATIVES

Dans le domaine des vibrations, les textes restent assez généraux. Cependant la prise en compte du respect du droit des tiers oblige le maître d'ouvrage à contrôler les phénomènes vibratoires liés aux chantiers.

Le Cahier des Clauses Administratives Générales Travaux fait référence à l'emploi d'explosifs à l'article 31-11 (*emploi des explosifs*) du chapitre IV (*réalisation des ouvrages*). La responsabilité est donnée à l'entrepreneur qui doit prendre des précautions par rapport aux propriétés et ouvrages voisins.

Le Cahier des Clauses Techniques Générales, dans son fascicule n°69 en cours de révision, précise à l'article "Préservation de l'environnement durant le chantier" qu'il "convient d'empêcher, de réduire ou de maîtriser la création de nuisances [...] afin de réduire les impacts environnementaux. Le C.C.T.P. définit les exigences contractuelles au regard des contraintes environnementales et donne toutes précisions utiles pour leur prise en compte pendant l'exécution des travaux. Il s'agit notamment de traiter les sujets suivants [...] réduction des nuisances sonores, des surpressions aériennes et des vibrations."

Les tribunaux peuvent quant à eux se référer aux deux textes suivants :

- la circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises par les installations classées pour la protection de l'environnement,
- l'arrêté du 22 septembre 1994 accompagné de la circulaire n°96-52 du 2 juillet 1996 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières.

Enfin, la mesure des vibrations et l'évaluation des réponses des constructions, des matériels sensibles et des occupants sont soumises à la norme *NF E90-020 de juillet 2007*.

QUELQUES RÉFÉRENCES UTILES

- 1] Annexe 4.7 de la section 4 du dossier pilote Génie civil : étude et contrôle des ébranlements liés à l'utilisation des explosifs / CETU / 1998.
- [7] Terrassements à l'explosif dans les travaux routiers / Guide technique CFTR / janvier 2002.
- [8] Étude de vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux / Rapport de recherche du LCPC N°105 / 1981 / Pierre Chapot.
- [9] Étude des effets sismiques de l'explosif / recommandation de l'Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES) / 1982 (mise à jour 2007).
- [10] Effets de vibrations dues à des tirs de mines sur du béton aux jeunes âges / Thèse d'Anne Denoyelle de l'ENSM de Paris / 28 juin 1996 pour Edf.
- [11] Tirs en masse et vibrations / édition EGICO / 1994 / Bruno Froment.

4. SURPRESSIONS AÉRIENNES



Le terme "surpression aérienne" qualifie l'onde de choc transmise dans l'air lors de la mise à feu d'un tir de mines. Ce phénomène ne concerne donc que la phase chantier des tunnels dont le creusement s'effectue à l'explosif. D'une manière générale, toute explosion provoque une onde de surpression aérienne dont l'intensité dépend du volume de gaz émis et de la vitesse de cette émission. Les tirs souterrains se caractérisent pour leur part par un confinement faible des charges, une séquence de tir longue et une propagation de l'onde de choc dans l'axe du tube creusé. Ces particularités imposent une étude spécifique de ces phénomènes d'intensité forte mais localisée.

Cette thématique a longtemps été assimilée à du bruit et mesurée comme tel, tendant à sous-estimer son impact réel qui se traduit par une mise en vibration des structures selon un régime particulier affectant les éléments en élévation des constructions.

Le cas particulier d'utilisation d'explosif pour la mise en œuvre de tranchées couvertes n'est pas traité car il se rapproche d'un chantier à l'air libre.

TIR SOUTERRAIN ET SURPRESSIONS AÉRIENNES

La mise à feu d'un explosif correspond à une réaction chimique transformant à très grande vitesse un corps solide en gaz (1 kg d'explosif se transforme en environ 800 l de gaz). Ces gaz se détendent dans la roche, dont ils provoquent la fissuration et le déplacement, puis dans l'atmosphère, générant à courte distance du tir une onde de choc dans l'air, appelée "souffle". Au-delà de quelques mètres des charges, cette onde se propage à la vitesse du son (340 m/s) et provoque une compression de l'air suivie d'une zone de dépression (*Cf. illustration 5*).

Le déplacement des matériaux abattus à grande vitesse (quelques dizaines de m/s) provoque également une onde de surpression de même type mais à fréquence initiale plus basse.

Toutes ces ondes, dites en N, se caractérisent par une composante initiale de surpression à fréquences audibles qui correspond à une densification des gaz (air ambiant et gaz issus du tir) dans un volume réduit concentré immédiatement derrière le front de l'onde. La concentration des molécules de gaz dans cette zone provoque leur raréfaction à l'arrière, créant une zone de dépression affectant un volume plus large, la pression revenant progressivement à sa valeur initiale. Cette zone de dépression se caractérise par des fréquences basses et inaudibles. Ces phénomènes sont du même ordre que ceux associés à un impact de foudre ou un bang supersonique.

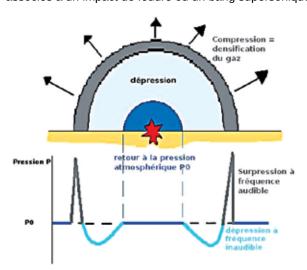


Illustration 5 : propagation des ondes de type N (source : LRPC de Clermont-Ferrand)

La fréquence associée à ces ondes diminue en s'éloignant de la charge pour se concentrer au-delà de quelques dizaines de mètres dans le domaine des infrasons inaudibles (fréquences comprises entre 1 et 20 Hz).

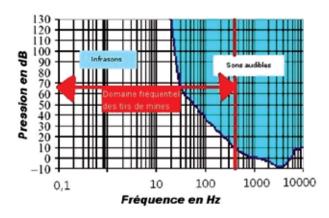


Illustration 6 : limite inférieure d'audibilité (source : Fletcher et Munson)

La spécifité des tirs souterrains réside dans :

- un faible confinement des charges qui favorise une vitesse importante d'émission des gaz dans l'atmosphère et de déplacement des matériaux abattus : les charges se situent à quelques dizaines de centimètres du front contre quelques dizaines de décimètres en tir aérien;
- une charge spécifique élevée qui produit un volume important de gaz par mètre cube de roche extraite (de l'ordre de 1 kg d'explosif par m³ contre 0,4 kg en tir aérien);
- une propagation initiale dans l'axe du tunnel qui provoque une concentration de la surpression suivant une direction privilégiée, avec une très faible atténuation à l'intérieur du tube (effet "canon");
- une séquence de tir longue marquée par une succession d'ondes durant 5 à 8 secondes contre 1 seconde en tir aérien : ceci accroît l'inconfort ressenti par les riverains.

Lorsque les fronts successifs de cette onde de choc atteignent une construction, ils provoquent la mise en vibration des éléments légers en élévation suivant une progression liée à l'intensité du phénomène (lustres, objets suspendus ou posés, puis cloisons et plafonds légers, plancher en bois puis en béton, charpente, etc.). L'onde de choc est susceptible de gêner et d'inquiéter les riverains exposés, voire exceptionnellement d'endommager certains éléments de structure. La perception de cette onde aérienne, dont la majeure partie de l'énergie est inaudible, est décrite par les riverains comme une vibration.

1.2 IMPACTS ET ENJEUX LIÉS AUX SURPRESSIONS AÉRIENNES

Les impacts liés aux surpressions aériennes sont semblables à ceux provoqués par les vibrations transmises par le terrain. Il s'agit donc notamment des dommages aux structures et aux équipements sensibles ainsi que de la gêne des riverains.

La différence réside dans le mode de sollicitation des structures, le point d'entrée des vibrations étant ici les façades et d'une manière générale tous les éléments en élévation et non les fondations.

L'unité physique de référence est le Pascal (Pa), qui présente l'inconvénient de varier sur une échelle très large pour décrire des phénomènes d'effets peu contrastés (*Cf. tableau 6*). Il est d'usage, pour pallier cet inconvénient, d'utiliser une échelle logarithmique exprimée en décibel, qui conduit toutefois à une confusion avec les mesures de bruit.

La mesure de la surpression s'exprime en décibel mathématique selon la formule :

 $P_{_{\rm dBL}}$ = 20 log ($P_{_{\rm pa}}$ / $P_{_{\rm 0}}$) avec $P_{_{\rm 0}}$ pression arbitraire de référence égale à 2.10 $^{\text{-}5}$ Pa et $P_{_{\rm pa}}$ pression mesurée en Pascal.

Cette unité non pondérée en fréquence et calculée sur un signal impulsionnel non moyenné est notée dBL ou dBF. Cette notation limite la confusion avec les mesures de bruit correspondant à des valeurs moyennées sur une unité de temps

et pondérées en fréquence selon la réponse de l'oreille humaine. Elles sont notées dBA ou dBC selon la pondération retenue.

Le *tableau* 6 décrit les effets progressifs de la surpression aérienne émise par un tir en fonction de son intensité exprimée en Pa et dBL.

Pression en dBL	Pression en Pa	Effets constatés ou seuils applicables
<100	<2	surpression imperceptible
112	8	apparition des premières plaintes
120	20	les plaintes deviennent nombreuses, les vitres vibrent et les lustres oscillent
125	35	seuil conseillé par l'arrêté "carrière" du 22/09/94
130	63	seuil USBM (United States Bureau of Mines) de dommages, vibrations sensibles des planchers
135	112	dégâts superficiels (chutes d'enduits décollés, déplacement de tuile)
140	200	bris des vitres les plus fragiles
145	350	seuil, reconnu internationnalement, d'exposition des personnes non protégées
170	6 000	bris de toutes les vitres

Tableau 6 : effet d'une surpression aérienne en fonction de son intensité (source : LRPC de Clermont-Ferrand)

DÉMARCHE D'ÉTUDE

Dans l'esprit, la démarche reste la même que pour les tassements et les vibrations solidiennes au travers des cinq étapes techniques suivantes :

- (1) détermination des effets du creusement,
- (2) état initial,
- (3) évaluation de la vulnérabilité des constructions,
- (4) détermination des seuils de pilotage contractuels et définition des auscultations,
- (5) mise en œuvre des auscultations et description de la chaîne de décision.

Cependant, la prise en compte de l'impact des surpressions aériennes est récente. Peu de projets intègrent une démarche d'étude complète de ces phénomènes depuis les phases amont jusqu'à l'exécution. A l'inverse des vibrations transmises par le sol qui peuvent être modélisées à partir de charges isolées mises en œuvre lors des études, il est impossible de disposer d'une source comparable pour les surpressions aériennes. Les conditions d'émission ne peuvent pas être reconstituées à échelle réduite. L'état des lieux initial (2) joue donc un rôle déterminant faute de pouvoir effectuer une véritable détermination des sollicitations que vont subir les constructions.

4.3.1 Au stade des études amont

Les études amont permettent à partir de l'analyse du site et de son environnement d'estimer le risque et d'apprécier les impacts de ce risque sur les travaux (*Cf. chapitre 4.4.1*).

Cette phase d'étude oriente le choix de la méthode de creusement.

4.3.2 Au stade de la conception

Les seuils de surpressions admissibles (3) par une structure sont ensuite fixés au stade des études de conception. A partir de ces seuils admissibles sont déduits les seuils de pilotage (4). Cette détermination des seuils de pilotage est suivie de la définition des auscultations (4) nécessaires.

Les seuils de pilotage figurent au CCTP.

4.3.3 Au stade de l'exécution

Comme pour toutes les thématiques susceptibles d'avoir un impact sur les structures, il est recommandé au maître d'ouvrage de réaliser un référé préventif.

L'étude des surpressions peut être complétée en tout début de chantier par la réalisation de tirs en condition réelle, dits tirs expérimentaux.

En cours de chantier, le pilotage consiste à adapter le plan de tir en fonction des auscultations.

MÉTHODES ET MOYENS D'ÉVALUATION

4.4.1 Estimation des risques à partir de l'état des lieux

L'estimation des risques s'effectue à partir d'une analyse du site et d'un inventaire des structures, des équipements sensibles et des personnes susceptibles d'être exposées. Les critères à prendre en compte sont :

- la distance à la tête du tunnel et la position relative par rapport à l'axe du tunnel : la zone de sensibilité s'étend généralement de la tête jusqu'à 200 à 500 m, avec un cône d'ouverture de l'ordre de 30° en terrain plat,
- la topographie et l'occupation du sol ainsi que la végétation,
- la sensibilité des récepteurs aux effets induits par la surpression qui s'analyse selon la nature des récepteurs au regard des aspects suivants :
 - > pour les bâtiments : le type de construction, la surface des façades, la portée des planchers, etc.
 - > pour les équipements sensibles : le type d'équipement, le mode de fonctionnement, le système d'isolation, etc.
 - > pour les personnes : le type d'activité, la période d'absence, etc.

A partir de ces critères, il est possible de définir de façon empirique et à dire d'expert, des zones de probabilité décroissante de risques.

Il existe par ailleurs des modèles empiriques de propagation mais ils dépendent de facteurs locaux très variables qui rendent leur utilisation délicate en l'absence de mesures *in situ* de la source réelle. Il est probable que la multiplication des mesures conduira dans l'avenir à disposer de modèles de prévision plus fiables, dans un domaine dont la prise en compte demeure récente et le retour d'expérience faible.

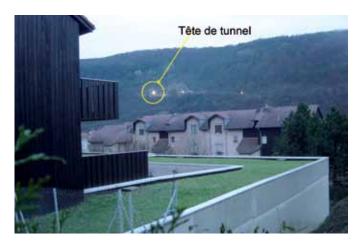


Photo 2 : site à topographie défavorable avec un tunnel en milieu de versant en présence de falaises rocheuses (source : LRPC Clermont-Ferrand)

4.4.2 Évaluation de la vulnérabilité des constructions

Il s'agit de fixer les seuils à ne pas dépasser au niveau des différentes structures qui auront pu être identifiées, en intégrant les équipements sensibles et la présence des riverains. Ce travail est à mener par un expert en surpressions aériennes. Le *tableau* 6 donne une idée de l'échelle des valeurs envisageables.

4.4.3 Détermination des seuils de pilotage contractuels et définition des auscultations

A partir des seuils d'admissibilité sont déduits les seuils de pilotage intégrant une marge de sécurité. Le pilotage du chantier repose alors sur la maîtrise des surpressions à partir de l'analyse et de l'adaptation du plan de tir. La détermination de ces seuils s'accompagne de celle des auscultations.

affectant tout ou partie d'une structure, afin de définir les dispositions techniques permettant de respecter les seuils de vibrations qui ont été fixés pour la maîtrise de cet impact ou de prendre en compte des plaintes de riverains. Cette démarche s'impose lorsque les plaintes se multiplient ou perdurent alors que les vibrations mesurées sur fondations demeurent faibles, voire s'atténuent (pour cet aspect mesure et contrôle, se référer également à la thématique "vibrations solidiennes").

4.4.4 Mise en œuvre des auscultations

En cours de chantier, les mesures de surpression permettent de surveiller que les dispositions retenues sont adaptées et si besoin de les faire évoluer.

La mesure des surpressions aériennes est réalisée à partir de microphones "basses fréquences". Ces microphones sont synchronisés avec des capteurs tridirectionnels afin de mesurer les vibrations. Le mode opératoire de cette mesure est décrit dans la *norme ISO7196:1995* (non NF). Cette mesure conjointe des vibrations et des surpressions permet de définir la part relative d'énergie transmise aux structures par le sol ou l'air, les ondes de choc associées se propageant à des vitesses très contrastées (quelques milliers de m/s dans le sol contre quelques centaines dans l'air *-Cf. illustration 7-*).

Quant à l'emploi de sonomètres dédiés aux mesures de bruit, il ne permet pas de caractériser la surpression aérienne dont l'énergie principale transmise se situe dans le domaine des infrasons.

L'objectif des mesures synchrones de vibrations et de surpressions est d'identifier l'origine principale des vibrations

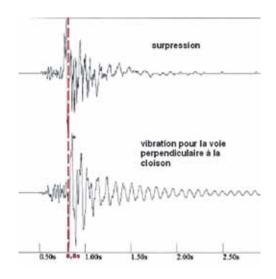


Illustration 7 : mesure de surpression et de vibration par un capteur scellé au milieu d'une cloison en briques à 120 m d'un tir de mine de 500 kg d'explosifs, sur le site expérimental de Cressy-sur-Somme. L'onde aérienne provoque les vibrations maximales. La vibration transmise par le sol se situe entre 0,5 et 0,8 s, l'onde de surpression aérienne lui succède entre 0,8 et 1,5 s. La vibration de la cloison après 1,5 s correspond à sa phase d'amortissement libre à sa fréquence propre (source : LRPC de Clermont-Ferrand).

MESURES DE RÉDUCTION DES IMPACTS

Les surpressions aériennes constituent un facteur essentiellement de gêne, nécessitant en premier lieu une démarche d'information et d'explication préalable auprès des riverains. La gêne sera perçue moins défavorablement après information.

Cette démarche initiale doit être poursuivie lors des travaux par une communication continue portant notamment sur les mesures de contrôle réalisées au contact direct des riverains et par le traitement des éventuelles plaintes. Au-delà de cette démarche d'information, des mesures concrètes sur le chantier permettent aussi de diminuer les niveaux de surpression. Ces mesures s'articulent autour de deux principes : la limitation de l'énergie de la source et la dissipation de l'énergie produite. Concernant ce dernier point, il existe des systèmes dissipateurs d'énergie mais leur dimensionnement est à ce jour mal connu par manque d'expérience.

Pour mettre en application ces principes permettant de diminuer les surpressions au niveau des zones exposées, les principales mesures envisageables sont les suivantes :

- action à la source, en modifiant les paramètres des plans de tir tout en s'assurant que la réduction des surpressions n'induit pas une augmentation des vibrations transmises par le sol, par :
 - > respect d'un bourrage minimum,
 - > optimisation de la charge spécifique afin d'éviter de surcharger le tir,
 - > limitation de la quantité totale d'explosifs,
 - > séquence d'amorçage adaptée.
- action lors de la propagation dans et à la sortie du tube pour :
 - > perturber l'écoulement des gaz : amorce des galeries latérales ;

- > absorber de l'énergie par travail mécanique : obstacles lourds à un degré de liberté type rideau de madriers pendus ;
- > dévier l'axe privilégié d'émission : merlon de terre en tête de l'ouvrage.

La plupart de ces dispositions demeurent de mise en œuvre lourde et restent d'une efficacité difficile à estimer au stade actuel des connaissances sur ces phénomènes. Aussi, la réduction des surpressions passe également par un phasage adapté des travaux (sens d'attaque du creusement, galeries de secours qui peuvent créer un obstacle perturbant favorablement l'écoulement des gaz, etc.) et la fixation de créneaux horaires de tir dépendant de l'activité des riverains pour limiter la gêne et l'exposition des équipements sensibles.

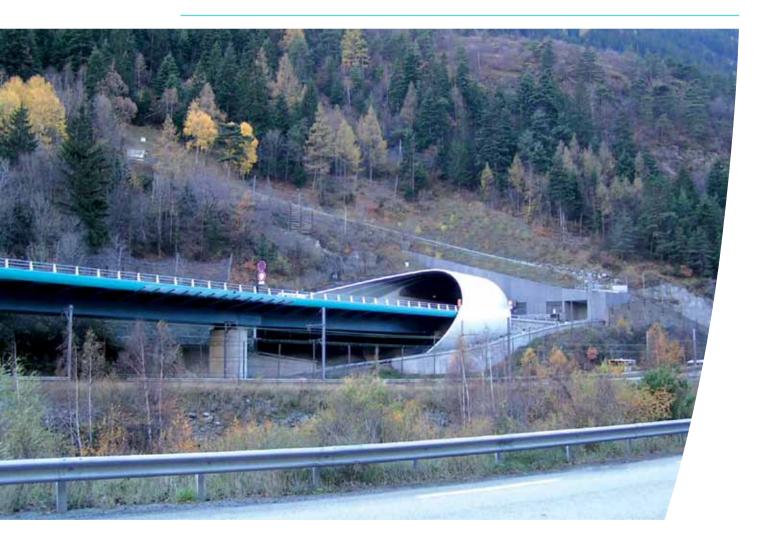
4.6 DISPOSITIONS RÉGLEMENTAIRES OU NORMATIVES

Il n'existe pas à ce jour de textes réglementaires traitant spécifiquement de ce phénomène. Les dispositions réglementaires ou normatives sont communes avec la thématique des vibrations solidiennes (*Cf. chapitre 3.6*).

4.7 QUELQUES RÉFÉRENCES UTILES

- [7] Terrassements à l'explosif dans les travaux routiers / Guide technique CFTR / janvier 2002.
- [12] La surpression aérienne / TIRS Applications et implications Les techniques de l'industrie minérale n° 14 / juin 2002 / Alain Blanchier.
- [13] Limites d'exposition aux infrasons et aux ultrasons Étude bibliographique / INRS-Hygiène et sécurité du travail -Cahiers de notes documentaires / 2ème trimestre 2006 / Jacques Chatillon.

5. BRUIT



En phase d'exploitation, les nuisances acoustiques liées à un ouvrage de type tunnel ou tranchée couverte sont principalement de deux ordres :

- une concentration, au niveau de l'environnement proche des têtes, des émissions acoustiques,
- le bruit lié à l'utilisation de systèmes mécaniques de ventilation.

La phase chantier de ces ouvrages implique pour sa part l'utilisation de techniques de creusement souvent lourdes, la présence localisée et sur de longues durées de matériel bruyant ainsi que la circulation répétée d'engins, qui sont autant de facteurs pénalisants du point de vue de la gêne sonore.

Concernant les usagers, même si le passage dans un environnement clos et très réfléchissant provoque une augmentation significative du niveau à l'intérieur de l'habitacle, le temps d'exposition réduit, les niveaux résultants bien inférieurs aux seuils de dangerosité et les performances en isolation des véhicules ne justifient pas de mesures de réduction particulières. A ce titre, ce chapitre ne s'intéresse qu'aux impacts acoustiques extérieurs des ouvrages.

SPÉCIFICITÉS DES TUNNELS VIS-À-VIS DE LA PROBLÉMATIQUE DU BRUIT

5.1.1 Le bruit d'origine routière

Un tunnel ou une tranchée couverte limite considérablement les émissions acoustiques le long de l'infrastructure qu'ils abritent. Sauf cas très particuliers (ouvrages ajourés par exemple), l'énergie sonore rayonnée le long de l'ouvrage peut être négligée. Un tunnel ou une tranchée couverte constitue en revanche un guide d'onde dans lequel l'atténuation acoustique reste faible avec la distance. Les parois très réfléchissantes des ouvrages favorisent en effet la réverbération. Une partie importante de l'énergie émise par les véhicules circulant dans le tube est donc rayonnée aux têtes de l'ouvrage, avec une directivité qui dépend de la géométrie de ces têtes.

Du fait de ce champ réverbéré, un véhicule et a fortiori une flotte de véhicules, pourront être perçus à l'extérieur dans l'environnement des têtes, même s'ils se trouvent à grande distance du récepteur. La sortie d'un véhicule provoque également une augmentation brusque du niveau acoustique dans l'environnement proche de la tête.

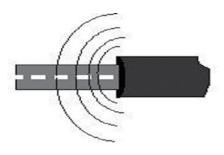


Illustration 8 : rayonnement hémisphérique du bruit par une tête de tunnel (source : CETE de Lyon)

Certaines tranchées couvertes peuvent présenter des ouvertures spécifiques pour des questions de ventilation, d'éclairage ou de perception paysagère. Les ondes acoustiques peuvent alors se propager au travers de ces ouvertures. L'énergie sonore rayonnée le long de l'ouvrage ne peut plus être négligée. L'effet d'affaiblissement acoustique à l'extérieur, le long de l'ouvrage, est alors réduit. Il peut même être très limité lorsque ces ouvertures représentent une surface dépassant 10 % de la surface totale. L'évaluation de l'impact de ces ouvrages devra en tenir compte sous peine de sous-estimer les niveaux sonores. Ce cas de figure concerne aussi les ouvrages dont les parois possèdent un indice d'affaiblissement réduit. Ce dernier cas reste rare compte tenu des techniques constructives employées.



Photo 3 : vue extérieure d'une tranchée couverte ajourée le long du Gave de Pau (source : http://www.midi-pyrenees.equipement.gouv.fr)

5.1.2 Émissions acoustiques liées aux équipements de ventilation

Les équipements de ventilation dans les ouvrages constituent des sources acoustiques potentiellement sources de nuisances. Peuvent être distingués :

- les accélérateurs : placés en section courante du tunnel, ils permettent d'entretenir et d'accroître le flux d'air sur la longueur de l'ouvrage ;
- les ventilateurs d'extraction ou de soufflage placés dans des stations de ventilation.

Dans les deux cas, il s'agit de ventilateurs axiaux qui peuvent être équipés de silencieux en entrée et/ou en sortie de flux. Le recours à des ventilateurs centrifuges, généralement moins bruyants que les axiaux, est très rare en ventilation des tunnels routiers, essentiellement à cause de leur encombrement.



Illustration 9 : sources d'émission de bruit et dispositifs acoustiques (source : EPA Works Approval Application for the EastLink Tunnels/Australia)

Le bruit émis par les systèmes de ventilation possède trois origines : électrique, aérodynamique et mécanique. De manière globale, le niveau de puissance acoustique d'un ventilateur dépendra du type même de ventilateur, des caractéristiques des pales, du débit d'air, de la pression totale et du régime de rotation.

Le bruit produit par ces dispositifs pourra se superposer au bruit de trafic aux têtes de tunnel. Il est également émis au niveau des cheminées ou baies d'extraction placées aux extrémités ou le long de l'ouvrage, constituant autant de sources ponctuelles.

A titre d'information, on peut citer une formule donnant un ordre de grandeur de la puissance acoustique d'un ventilateur centrifuge :

Lw = 63 + 20 log PT + 10 log qv (formule empirique couramment utilisée) avec PT, pression totale du ventilateur en mm CE (colonne d'eau) et qv, débit du ventilateur en m³/s.

Photo 4 : cheminée du tunnel de la Croix Rousse débouchant sur le plateau de la Croix Rousse (source : CETE de Lyon)

Le contenu fréquentiel, appelé spectre, du bruit émis par les systèmes de ventilation est marqué par la présence de pics fréquentiels reliés au nombre de pales et à la vitesse de rotation (*Cf. illustration 10*). Il se distingue de celui du bruit routier. La fréquence fondamentale (FPP) en est déterminée à partir de la relation suivante :

FPP = nombre de pales x fréquence de rotation

Il est possible de percevoir ces émergences si le bruit de fond ne couvre pas totalement la dynamique du bruit du système aéraulique. La puissance acoustique, par bande d'octave ou de tiers d'octave, fonction du régime de rotation, est une donnée fournie par le constructeur des systèmes de ventilation.

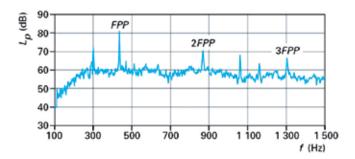


Illustration 10 : spectre en bandes fines d'un ventilateur à 9 pales tournant à 2893 tr/min. On notera les émergences fréquentielles de FPP, la fondamentale, et des harmoniques multiples de FPP (source : Le bruit des ventilateurs – T.Vincent – www.mssmat.ecp.fr)

5.1.3 Bruit en phase chantier

Outre les nuisances sonores propres à tout chantier routier, la nature même des tunnels implique des nuisances sonores spécifiques liées :

- aux techniques de creusement/terrassement: usage de foreuse, de tunneliers, d'explosifs, battage de palplanches, etc.
- à l'extraction de grandes quantités de matériaux, qui peut avoir pour conséquence un important trafic d'engins chargés d'évacuer les déblais,
- à la ventilation des tubes : le percement des tunnels peut nécessiter l'utilisation nocturne de systèmes de ventilation bruyants pour l'évacuation des poussières et autres gaz,
- à la localisation et la durée du chantier : les chantiers d'ouvrages d'art nécessitent la mise en place de postes spécifiques (centrales à béton, stations de pompage, etc.) présents de longues semaines.

IMPACTS ET ENJEUX LIÉS AU BRUIT

Les niveaux de bruit sont évalués à l'aide de valeurs moyennées sur une unité de temps et pondérées en fréquence selon la réponse de l'oreille humaine. La pondération la plus fréquemment utilisée pour estimer la gêne est le dB(A). Les sons audibles se situent au-delà de 0 dB(A) qui marque le seuil d'audition. La gêne associée au niveau élevé de bruit est quant à elle une notion subjective ressentie différemment d'un individu à l'autre. Aussi, aucune échelle de niveau sonore ne peut donner une indication absolue.

La présence de têtes de tunnel, de cheminées d'extraction ou de stations de ventilation à proximité de zones sensibles au bruit (en site urbain, ou lorsque des habitations ou bâtiments sensibles se trouvent à proximité immédiate) est de nature à augmenter l'exposition et la gêne. Les niveaux acoustiques engendrés par ces sources restent en phase d'exploitation suffisamment faibles pour ne pas engendrer d'impacts physiologiques sur le court terme (atteinte au système auditif).

L'augmentation, due à la présence des têtes de tunnels, du bruit lié à la circulation routière se situe par exemple entre 5 et 9 dB(A). Le caractère ponctuel des sources en limite par ailleurs les effets aux premières dizaines de mètres.

Quant au bruit lié aux équipements de ventilation, son spectre est dominé par des émergences à certaines fréquences, qui provoquent une gêne supérieure à un bruit large bande (routier à l'air libre par exemple) de même intensité. Ces sources potentiellement masquées la journée par le bruit ambiant peuvent émerger en période plus calme, en particulier la nuit, si leur fonctionnement se poursuit à des niveaux élevés. Mais a priori ce type d'installation a un fonctionnement limité la nuit (le trafic plus faible ne nécessite pas de ventilation sanitaire). Il existe qui plus est des solutions techniques efficaces pour en limiter les nuisances acoustiques.

Les impacts sonores en phase chantier sont pour leur part globalement les mêmes que ceux d'un chantier de BTP classique, auxquels s'ajoutent le bruit lié à la ventilation de chantier, et ils cessent à l'achèvement des travaux. Certains moyens mis en œuvre pour réaliser ce type d'ouvrage (excavation lourde, minage, chantiers longs, etc.) nécessitent une vigilance particulière pour en limiter les effets.



Illustration 11 : échelle de bruit (source : Bruitparif)

DÉMARCHE D'ÉTUDE DE LA POLLUTION SONORE

La démarche d'étude s'appuie sur la réglementation précisée par le Code de l'Environnement (*Cf. chapitre 5.6*) et relative à la lutte contre le bruit généré par les infrastructures de transport terrestre. Les quelques spécificités ou points de vigilance propres aux tunnels sont listés ci-après.

5.3.1 Au stade des études amont

Une attention toute particulière sera portée, au moment de la comparaison des variantes, sur les options concernant la position des têtes de tunnel. Un calcul simplifié de l'empreinte acoustique au niveau de ces têtes pourra être réalisé afin d'évaluer les populations potentiellement impactées. Une modification de la position, ou une prolongation, de la sortie de l'ouvrage pourra avoir un impact non négligeable sur le projet.

Les études doivent prévoir des mesures compensatoires (protections à la source ou isolation de façade) dans le cas où la contribution sonore du projet dépasse des objectifs réglementaires définis en fonction du niveau de bruit initial, de la nature des bâtiments exposés et de la période (jour ou nuit).

Les études comportent également des éléments de synthèse sur les effets du bruit sur la santé (sans spécificité liée aux tunnels).

5.3.2 Au stade des études de conception

Des études spécifiques liées à la géométrie ou au traitement des têtes de tunnel par matériaux absorbants peuvent être envisagées (*Cf. chapitre 5.4.2*). C'est également à ce stade que l'étude du dimensionnement des protections acoustiques liées aux systèmes de ventilation est menée.

En prévision de chantiers particulièrement sensibles, le maître d'ouvrage peut commander une étude spécifique des impacts sonores visant à l'optimisation de l'implantation du chantier et de ses circulations. Il peut également définir des niveaux sonores à ne pas dépasser en façade des bâtiments exposés. Ces seuils peuvent être déclinés en termes de niveaux acoustiques sur les périodes "réglementaires" (6h-22h en diurne et 22h-6h en nocturne) ou en adaptant ces périodes au rythme du chantier. Ils peuvent également s'exprimer en termes d'émergences à ne pas dépasser sur ces mêmes périodes.

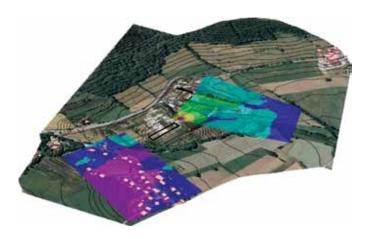


Illustration 12 : cartographie acoustique du chantier de construction du tunnel du Mont-Sion (tête nord) sur l'A41, carte réalisée avec le logiciel OASIS co-développé par le CSTB et Bouygues TP (source : CSTB)

5.3.3 Au stade de l'exécution

En phase travaux, aucune étude spécifique n'est attendue, on veillera seulement à la mise en œuvre des moyens de réduction des impacts prévisibles du chantier.

Si des niveaux sonores à ne pas dépasser ont été définis, la mise en place de ces seuils doit s'accompagner d'un suivi au travers d'un dispositif de surveillance permanent (sonomètres placés en façade des bâtiments ou en périphérie du chantier) visant à mesurer ces indicateurs et alerter le maître d'ouvrage d'éventuels dépassements. Une mesure individuelle du bruit couplée à une évaluation de la puissance acoustique émise par les véhicules ou installations de chantier peuvent être réalisées par prélèvement (mesure de courte durée). Elles permettent de compléter la connaissance de ces sources. Ces valeurs sont à mettre en regard des données constructeur (étiquetage constructeur selon la directive "machines" 98/37/CE).

MÉTHODES ET MOYENS D'ÉVALUATION DU BRUIT

5.4.1 Caractérisation de l'état initial et éléments d'évaluation de la situation acoustique

Une caractérisation de l'état initial doit permettre d'évaluer les enjeux en termes de nuisances sonores et fournir une "photographie" de l'environnement sonore. Différents éléments peuvent l'alimenter :

- le recensement des bâtiments sensibles aux bruits : bâtiments d'habitation, établissements de santé et scolaires, etc.
- une campagne de mesure des niveaux acoustiques (selon la norme NFS 31-085) quadrillant les zones à enjeux du projet : une telle campagne permet une caractérisation de l'environnement sonore et sert au calage des modélisations à venir,
- la modélisation des sources principales : elle vise à l'obtention d'une cartographie à l'échelle de la zone du projet, selon les indicateurs réglementaires français Leq_(6h-22h) pour la période de jour et Leq_(22h-6h) pour la période de nuit.

Le bureau d'études mandaté par le maître d'ouvrage peut compléter son travail avec les données du classement sonore des voies et de la cartographie stratégique européenne, si le territoire concerné est couvert.

5.4.2 Modèles numériques et maquettes

Le tableau n° 7 présente un panel représentatif des méthodes qui peuvent être utilisées ou adaptées pour évaluer le bruit routier issu d'un tunnel. Dans la majorité des cas, les modèles acoustiques d'ingénierie obéissant à la norme NF 31-133 (Cf. chapitre 5.6) permettront d'intégrer ce type d'ouvrage et de répondre aux attentes en termes d'études amont.

Dans certains cas particuliers, comme l'étude fine de l'influence de la géométrie de la tête de tunnel, il est possible de recourir à une modélisation avancée par éléments finis. Son emploi reste néanmoins marginal.

Les autres méthodes sont citées à titre d'illustration, et n'ont plus cours aujourd'hui.

5.4.2.1 Modélisation du bruit routier aux extrémités des tubes

Sauf dans le cas de modélisations pointues rarement mises en œuvre (méthodes d'éléments finis de frontières ou de volume), le rayonnement acoustique des têtes de tunnel est assimilé à celui d'une ou plusieurs sources équivalentes placées à l'extrémité de chaque tube. Il est en particulier possible de s'appuyer sur la méthode proposée dans le Guide du Bruit des Transports Terrestres (Ministère des Transports, 1980 -document en cours de révision- [14]).

Type de modèle	Avantages	Inconvénients	Coût	Champ d'application
Méthodes type "guide du bruit"[14]	• simples à mettre en œuvre, méthodes "manuelles"	 approches très simplifiées, pas adaptées aux sites complexes à petites échelles 	faible	peu ou plus utilisées pour les études
Modèles d'ingénierie acoustique	relativement simples à mettre en œuvre, exploitation statistique facile, possibilité de prendre en compte le relief et certains obstacles, ainsi que les propriétés des sols cartographie à grande échelle modélisation possible des bouches de ventilation (sources ponctuelles)	 modélisation des tunnels qui reste simplifiée pas une vraie 3D modélisation de sources équivalentes en sortie de tunnel 	moyen	les plus couramment utilisés à tous les stades d'études précision satisfaisante compte tenu des enjeux
Modèles "recherche" (Éléments finis de frontière)	 précision possibilité de modéliser des systèmes à géométrie complexe (entrée de tunnel) 	 gros investissement en temps et moyens de calcul disponibilité limitée et nécessitant une expertise importante 	élevé	restent très peu utilisés aujourd'hui compte tenu des enjeux (faibles) et du coût
Modèles physiques (maquette)	• représentation fidèle de l'environnement	lourds à mettre en œuvre interactions limitées	très élevé	réservés aux études très fines, aujourd'hui pratiquement plus utilisés

Tableau 7 : avantages et inconvénients des différentes méthodes de modélisation de la propagation acoustique (source : CETE de Lyon)

Par extension du théorème de Huygens, le champ acoustique compris entre l'extrémité du tunnel et une distance d'environ une à trois fois sa largeur est assimilé à un champ diffus progressif. Le champ rayonné par la tête de tunnel est alors représenté par une source ponctuelle fictive placée au centre de la tête du tube et caractérisée par une puissance L_{ω} estimée par :

 $L_w = L_{wm} - 10 \log(A/S)$

où $L_{\mbox{\tiny wm}}$ est le niveau de puissance émise par la circulation par mètre de voie, A l'aire d'absorption équivalente (coefficient d'absorption moyen des parois x surface des parois) du tunnel par unité de longueur et S la surface de coupe du tunnel. Les règles de propagation pour une source ponctuelle s'appliquent alors à cette source équivalente, comme par exemple la loi de divergence géométrique conduisant à une décroissance du niveau de 6 dB par doublement de la distance à la source.

Il convient de souligner que ces lois ne tiennent pas compte de la géométrie des têtes de tunnel et de leur directivité plus ou moins marquée.

5.4.2.2 Modélisation de la puissance acoustique rayonnée par les dispositifs de ventilation

La puissance acoustique des ventilateurs est une donnée fournie par les constructeurs sous forme de spectre de puissance en fonction des vitesses ou débits d'utilisation.

En fonction de la longueur des gaines de ventilation et des silencieux placés sur le chemin aéraulique, cette puissance sera atténuée. S'en déduit la puissance rayonnée au niveau des bouches de ventilation, assimilées à des sources ponctuelles. Ces sources peuvent être ajoutées dans les modèles de propagation et leur effet superposé à celui d'autres sources. Une connaissance précise du régime de fonctionnement journalier des systèmes de ventilation peut s'avérer utile pour identifier d'éventuelles situations d'émergence de source (fonctionnement nocturne en particulier).

MESURES DE RÉDUCTION DES IMPACTS

5.5.1 Réduction des nuisances liées au trafic en phase d'exploitation

De façon générale, les mesures d'atténuation acoustique sont toujours d'autant plus efficaces qu'elles s'appliquent à la source ou au plus près de celle-ci. Il s'agit de maîtriser l'énergie acoustique avant qu'elle ne se propage et diverge naturellement, impactant alors de plus larges zones.

5.5.1.1 Le principe d'éloignement

Avant d'envisager tout système de protection physique, le choix du tracé et en particulier l'éloignement des têtes de tunnel des zones sensibles permet de réduire en amont l'exposition des populations. Pour une source ponctuelle la décroissance par doublement de la distance est de 6 dB contre 3 pour une source linéique telle qu'une route.

5.5.1.2 L'action sur la vitesse

Agir sur la vitesse permet de réduire le bruit de roulement (contact pneu-chaussée) prépondérant par rapport au bruit du moteur au dessus de 50 km/h pour les VL et 60 km/h pour les PL.

	Gain en dB suite à réduction de vitesse			
Réduction	Revêtement peu bruyant	Revêtement standard	Revêtement bruyant	
50 à 30 km/h	2,5	3,4	3,9	
70 à 50 km/h	2,3	2,8	2,8	
90 à 70 km/h	1,9	2,1	2,2	
110 à 90 km/h	1,6	1,7	1,8	
130 à 110 km/h	1,4	1,4	1,5	

Tableau 8 : estimation de la diminution des émissions d'une source routière en fonction de la réduction de vitesse et du type de revêtement (source : guide pour l'élaboration des Plans de Prévention du bruit dans l'environnement – CERTU - 2008)

L'effet d'une réduction de 10 km/h sur la vitesse se traduit par une chute d'environ 1 dB du niveau acoustique. Ce gain dépend néanmoins de la vitesse initiale et de la qualité du revêtement. Ainsi l'effet est d'autant plus important que la vitesse est faible et que le revêtement est bruyant.

5.5.1.3 La modulation du débit

L'énergie acoustique émise est proportionnelle au débit de trafic. En termes de niveaux sonores, ce constat se traduit par la relation suivante :

 $L_{eq\,(Q\,v\acute{e}hicules)}=L_{eq\,(1\,v\acute{e}hicule)}+10\,log(Q)$ où Leq est le niveau de bruit équivalent et Q le débit de véhicules.

Toutes choses étant égales par ailleurs (composition et dynamique du trafic), un doublement ou une division par deux du trafic se traduit donc par une variation de + ou -3 dB. L'enjeu sera de 1 dB pour une variation de 30 % de Q et 0,5 dB pour 10 %.

Pour certains tunnels particulièrement longs, le fait d'imposer des distances de sécurité minimales entre véhicules aura une action sur les débits et donc le bruit.

5.5.1.4 L'action sur le trafic poids lourd

Du point de vue acoustique, l'équivalence entre l'émission d'un PL et celle d'un VL varie entre 4 (pente < 2 % sur autoroute) et 20 (pente > 6 % pour une voie urbaine), avec une moyenne autour de 10. Les mesures visant à limiter ou contraindre le trafic PL peuvent donc favoriser une diminution significative de la nuisance acoustique. On différenciera bien en particulier les périodes diurne et nocturne.

5.5.1.5 Le choix du revêtement

Deux grands types de chaussées acoustiques sont à ditinguer :

- les bétons bitumineux minces, très minces, et ultraminces: ils sont caractérisés par une granulométrie et une épaisseur faibles. La faible granulométrie permet de réduire le bruit de contact et conduit à des gains de plusieurs dB par rapport à un enrobé classique, lorsqu'ils sont en bon état. Leur usage est compatible avec les contraintes des tunnels et tranchées couvertes. Leur utilisation est surtout intéressante au niveau des têtes de tunnel, dans les premières dizaines de mètres de part et d'autre des extrémités;
- les bétons bitumineux drainants acoustiques : leur structure poreuse permet d'absorber une partie de l'énergie acoustique et de limiter le bruit de roulement. L'instruction technique (annexée à la circulaire n° 2000-63) du 25 août 2000 précise que : "les couches de roulement drainantes sont proscrites à l'intérieur des tunnels à plus de 50 m des têtes. Si une telle couche de roulement est utilisée aux abords du tunnel, le changement sera effectué dans une zone couverte afin d'éviter de créer, en cas de pluie, un point singulier en termes

d'adhérence ou de projections à l'entrée ou à la sortie du tunnel." Ces chaussées peuvent en effet constituer de dangereux réservoirs pour les carburants en cas d'accident, inconvénient peu compatible avec les contraintes d'exploitation d'un ouvrage souterrain. Ces contraintes d'utilisation en tunnel rendent leur intérêt limité.

La réduction des émissions sonores liées à l'usage d'un enrobé spécifique, qu'il soit drainant ou non drainant, est variable en fonction de la technique employée. Elle peut atteindre 7 à 8 dB(A) à l'air libre comme en tunnel par rapport à une technique de chaussée classique. La mise en œuvre joue un rôle très important avec des différences constatées de plusieurs décibels sur des enrobés issus des mêmes techniques. Le choix ou la provenance des granulats, la température de mise en œuvre sont des facteurs qui peuvent expliquer ces résultats.

Les performances acoustiques d'un enrobé, quel qu'il soit, varient fortement en fonction de son état. En moyenne, la perte d'efficacité de ces revêtements est de 0,5 dB/an. Cette modification des propriétés est accélérée par un fort trafic poids-lourds, des conditions climatiques extrêmes ou des tracés favorisant de fortes contraintes sur la chaussée.

5.5.1.6 L'utilisation de dispositifs spécifiques de protection

Des modifications de la géométrie de la tête de tunnel peuvent avoir un impact non négligeable sur son rayonnement acoustique.

Il peut s'agir de prolonger artificiellement le tube (*Cf. photo 5*). Ce prolongement fonctionne comme une couverture acoustique et peut procurer des gains de plusieurs décibels sur des bâtiments situés en vue directe de l'extrémité. Il permet également d'éloigner la source. La forme de ce prolongement influence aussi la directivité, c'est-à-dire les directions privilégiées suivant lesquelles l'énergie acoustique est rayonnée. La forme architecturale ne doit pas favoriser certaines réflexions en direction de zones bâties.



Photo 5 : tête de tunnel prolongée par un tube – Autoroute A43 en Maurienne (Orelle) – Outre son intérêt paysager, ce type de solution peut permettre de décaler de quelques dizaines de mètres la source d'émission (source : CETE de Lyon)

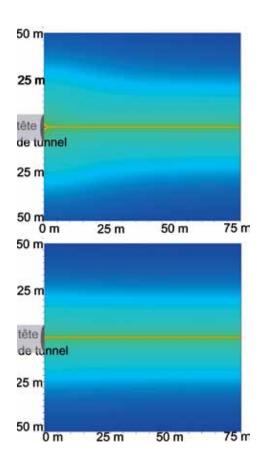


Illustration 13 : empreinte sonore d'une tête de tunnel assimilée à une source ponctuelle – en haut, revêtue de matériaux réfléchissants, en bas, revêtue de matériaux absorbants. L'influence du rayonnement acoustique émis par la tête de tunnel modifie le champ acoustique dans les toutes premières dizaines de mètres. Typiquement, au delà de 25 m, le champ réverbéré est couvert par le champ direct produit par l'infrastructure (source : CETE de Lyon)

Le traitement des extrémités de tunnel à l'aide de parements absorbants (*Cf. illustration n°13*) permet aussi d'atténuer l'énergie acoustique émise. Les prolongements éventuels peuvent être traités pour augmenter leur efficacité et limiter les réflexions sur d'éventuels bâtiments leur faisant face. En l'absence de prolongement, ce traitement absorbant s'applique à l'intérieur du tunnel sur une distance de l'ordre de deux à trois fois le diamètre du tunnel (*Woehner, 1992, [15]*). Le traitement intégral de l'intérieur du tunnel, d'un investissement conséquent, n'apporterait pas d'amélioration supplémentaire significative.

Concrètement, les gains potentiels de traitement des extrémités peuvent aller jusqu'à 10 dB(A), soit une division par dix de l'énergie acoustique. L'efficacité du traitement de la tête de tunnel est la plus importante dans un rayon de quelques dizaines de mètres autour de celle-ci. En-dehors de ce périmètre, le bruit émis par l'infrastructure découverte devient prédominant.



Photo 6 : parements acoustiques absorbants sur l'A43 dans la vallée de la Maurienne (source CETE de Lyon)

Les matériaux absorbants sont généralement les mêmes que ceux utilisés pour les écrans acoustiques. Ils supportent les contraintes climatiques et mécaniques inhérentes aux infrastructures routières. Les plus utilisés sont les panneaux de béton de bois (particules ou fibres de bois agglomérées par du ciment) et les dispositifs à base de laine minérale recouverts de panneaux métalliques perforés. Dans tous les cas, il faut s'assurer que les matériaux proposés sont compatibles avec les exigences de comportement au feu qui s'appliquent dans les tunnels. Comme pour les écrans, les performances acoustiques en absorption de ces matériaux sont évaluées selon les *normes EN 1793-1 et 1793-2*.

Enfin, l'utilisation de damiers phoniques, constitués de baffles de matériaux absorbants prolongeant le tunnel, constitue une solution intéressante pour limiter les émissions des trémies longues ou des tranchées couvertes.



Photo 7 : un damier phonique (source : Les écrans acoustiques – Guide CERTU - 2007 - [16])

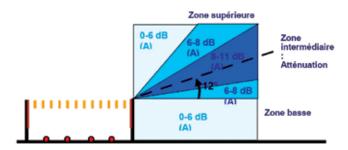


Illustration 14 : atténuation obtenue à l'aide d'un damier phonique (source : Les écrans acoustiques – Guide CERTU - 2007 - [16])

5.5.2 Réduction du bruit dû aux systèmes de ventilation

Plusieurs dispositifs et recommandations peuvent être envisagés.

Dans le cas d'un système de ventilation basé sur des accélérateurs en plafond, au-dessus du trafic, le bruit émis sort par les têtes et renvoie à la problématique du bruit du trafic routier aux têtes. Une action complémentaire est néanmoins possible avec la pose d'atténuateurs acoustiques en amont et/ou aval des accélérateurs.

Ces atténuateurs sont des silencieux linéiques : il s'agit de revêtements absorbants de type laine minérale recouvrant les parois de silencieux mis en place de part et d'autre des accélérateurs. L'efficacité de ces dispositifs dépend de l'épaisseur de matériau absorbant et surtout de la longueur des silencieux. Les sociétés commercialisant ces systèmes proposent le plus souvent des solutions complètes prédimensionnées intégrant dans le calcul de la puissance acoustique l'effet du silencieux.

Dans le cas d'un système de ventilation faisant intervenir une ou plusieurs stations de ventilation, il convient dans un premier temps, dans la mesure du possible, de placer les installations aussi loin que possible des zones sensibles au bruit. L'éloignement vis-à-vis de ces sources est particulièrement efficace puisqu'elles sont rapidement assimilables à des sources ponctuelles caractérisées par une divergence géométrique de -6 dB par doublement de la distance en conditions de propagation homogènes (sans influence du vent ou d'un gradient de température).

Lorsque l'application du principe d'éloignement n'est pas suffisante, la pose d'atténuateurs acoustiques constitue une solution efficace. Il s'agit d'atténuateurs dits à baffles ou "pièges à sons": dans ce cas, des panneaux de matériaux absorbants sont placés dans le circuit, régulièrement espacés pour autoriser un écoulement suffisant. Ils sont dimensionnés en fonction des besoins d'atténuation. L'efficacité des atténuateurs varie avec la fréquence. De manière générale, leur efficacité augmente avec la fréquence jusqu'à une fréquence de coupure

à partir de laquelle la performance décroît. Cette courbe de performance dépend de la géométrie de l'atténuateur et du matériau absorbant utilisé. Le système devra être dimensionné en fonction du spectre de bruit à atténuer.

L'optimisation du dimensionnement doit également être recherchée. Les ventilateurs possèdent une vitesse optimale de fonctionnement permettant d'assurer un débit maximum en provoquant le minimum de turbulences dans l'écoulement et donc le minimum de bruit. En amont, il convient donc de bien dimensionner les unités en fonction des besoins pour que les vitesses de rotation optimales soient utilisées et ceci le plus souvent possible. Des vitesses de rotation mal adaptées (trop basses ou trop élevées) peuvent aussi conduire à la mise en vibration de certaines parties du système et générer du bruit supplémentaire.

Enfin, lorsque les cheminées ne servent qu'au désenfumage épisodique du tunnel, il pourra être prévu d'adjoindre des clapets obturant les ouvertures pour limiter l'éventuelle propagation du bruit de trafic au travers de ces conduits.

5.5.3 Les impacts et mesures de réduction du bruit en phase chantier

Outre les obligations réglementaires imposant surtout une information du public, les mesures suivantes peuvent être envisagées au cas par cas :

- La gestion des plans de circulation des véhicules de chantier constitue un levier d'action important dans la mesure où les mouvements de camions évacuant les matériaux sont nombreux. Ce point est à anticiper avant le démarrage du chantier. Ce trafic supplémentaire sur des axes du réseau élargit le périmètre des nuisances. Des plans de circulation évitant les secteurs d'habitation dense ou la proximité de bâtiments sensibles seront recherchés. Afin d'en estimer les impacts, il est recommandé de réaliser une étude spécifique (modélisation des niveaux de bruit) lorsque les enjeux en termes d'exposition (milieu urbain en particulier) le justifient. Des indicateurs tenant compte des différentes périodes de la journée seront alors utilisés.
- Un système de suivi des niveaux de bruit peut être proposé. Il s'agit de mesurer en différents points la contribution du chantier et des postes particulièrement bruyants. Des objectifs à ne pas dépasser (en termes de niveaux moyens et surtout d'émergences) peuvent être fixés par le maître d'ouvrage.
- Le maître d'ouvrage peut tenir compte, dans son choix des entreprises, de l'utilisation ou non d'une flotte de véhicules et d'équipements de chantier peu bruyants, par référence aux exigences de la directive européenne 2000/14/CE

transposée en droit français par l'*arrêté interministériel du* 18 mars 2002. Il s'agit de favoriser l'emploi de matériels et de techniques les plus récents s'ils génèrent moins de nuisances.

Lors de l'usage d'explosifs, une partie de l'énergie des tirs est convertie en énergie acoustique dans le domaine des basses fréquences. Même si l'oreille humaine est naturellement protégée contre les infrasons et les basses fréquences, la gêne occasionnée nécessite au minimum des mesures d'information et une évacuation temporaire dans les cas les plus extrêmes (*Cf. chapitre 4*). Le caractère basse fréquence de ces ondes les rendent difficiles à atténuer sinon par éloignement.

5.6 **RÉGLEMENTATION**

La France s'est dotée d'un arsenal réglementaire et normatif conséquent sur le bruit. Il n'existe toutefois pas de texte spécifique aux tunnels ou tranchées couvertes. Ce sont donc les textes relatifs aux infrastructures de transport terrestre qui font référence et qui s'appliquent.

5.6.1 Code de l'environnement

Le Code de l'Environnement intègre l'essentiel de la réglementation relative au bruit. Il reprend en particulier les éléments de la *loi n°92-1444 du 31 décembre 1992*, codifiés aux *articles L571-9 et L571-10*.

L'article *L571-9 du Code de l'Environnement* impose de prendre en compte les nuisances sonores générées par les projets d'infrastructures de transport. L'*article L571-10* impose pour sa part le classement sonore de certaines infrastructures de transport. Ces modalités de classement sont précisées dans les *articles R571-32* à *R571-43* ainsi que dans un arrêté interministériel du 30 mai 1996. Ce dernier fixe également l'isolement acoustique minimal à prévoir pour les bâtiments d'habitation affectés par le bruit des transports terrestres.

Les articles R571-44 à R571-52 du Code de l'Environnement imposent à chaque maître d'ouvrage de prendre les mesures nécessaires pour limiter les nuisances sonores produites par les projets d'infrastructures de transport terrestre. L'arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières fixe notamment les seuils réglementaires à respecter en cas de création d'infrastructure routière.

Les *articles L122-1* à *L122-3* du Code de l'Environnement imposent un volet "effets du bruit sur la santé" dans les études d'impact.

Enfin, la réglementation des infrastructures de transport terrestre ne couvre pas explicitement la problématique du bruit produit par les systèmes de ventilation. Même si elle ne couvre pas les bruits "qui proviennent des infrastructures de transport et des véhicules qui y circulent", la réglementation sur le bruit de voisinage, et les articles R1334-30 à R1334-37 du Code de la Santé Publique en particulier, peuvent servir de référence pour fixer des seuils acoustiques (émergences en particulier).

5.6.2 Normes

Peuvent être citées principalement :

- les normes NF S 31-010 et 110, "caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement", qui traitent respectivement :
 - > des méthodes particulières de mesurage (AFNOR décembre 1996),
 - > des grandeurs fondamentales et méthodes générales d'évaluation (AFNOR novembre 2005),
- la norme NF S 31-085, "caractérisation et mesurage du bruit dû au trafic routier" (AFNOR novembre 2002),
- les normes NF S 31-131 et 132, "prévision du bruit des transports terrestres" qui traitent de :
 - > la description technique des logiciels (AFNOR août 2004).
 - > la typologie des méthodes de prévision (AFNOR décembre 1997),
- la norme NF S 31-133, "bruit des infrastructures de transport terrestre, le calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques" (AFNOR février 2007),
- les normes NF EN 1793-1, 2 et 3 relatives aux "dispositifs de réduction du bruit du trafic routier, méthode d'essai pour la détermination de la performance acoustique" (AFNOR novembre 1997) qui traitent respectivement :
 - > des caractéristiques intrinsèques relatives à l'absorption acoustique,
 - > des caractéristiques intrinsèques relatives à l'isolation aux bruits aériens,
 - > du spectre sonore normalisé de la circulation.
- les normes NF EN 1794-1 et 2 relatives aux "dispositifs de réduction du bruit du trafic routier, performances non-acoustiques" (AFNOR mars 2004) qui traitent respectivement:
 - > des performances mécaniques et exigences en matière de stabilité,
 - > des exigences générales pour la sécurité et l'environnement.

5.6.3 Le cas particulier de la phase chantier

L'article L571-9 du Code de l'Environnement renvoie pour le cas spécifique de chantiers d'infrastructure à la publication de décrets. Il s'agit des décrets n°95-22 du 09 janvier 1995 et n°95-408 du 18 avril 1995.

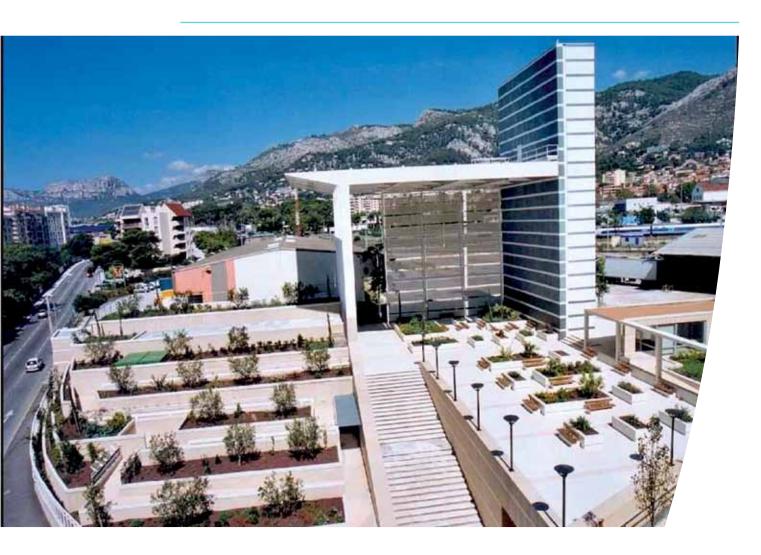
Ces décrets ont été retranscrits dans le Code de l'Environnement et dans le Code de la Santé Publique. L'article R571-50 du Code de l'Environnement précise que "préalablement au démarrage d'un chantier, [...] le maître d'ouvrage fournit au préfet [...] les éléments d'information utiles sur la nature du chantier, sa durée prévisible, les nuisances sonores attendues ainsi que les mesures prises pour limiter ces nuisances. Ces éléments doivent parvenir aux autorités concernées un mois au moins avant le démarrage du chantier [...]. Le préfet peut [...] prescrire [...] des mesures particulières de fonctionnement du chantier, notamment en ce qui concerne ses accès et ses horaires."

Si les chantiers peuvent dépasser les émergences de bruit communément admissibles, selon l'article R1337-6 du Code de la Santé Publique, "est puni de la peine d'amende [...] le fait [dans le cadre d'un chantier] de ne pas respecter les conditions de leur réalisation ou d'utilisation des matériels et équipements fixées par les autorités compétentes, de ne pas prendre les précautions appropriées pour limiter le bruit ou d'adopter un comportement anormalement bruyant".

5.7 QUELQUES RÉFÉRENCES UTILES

- [14] Guide du bruit et des transports terrestres, prévision des niveaux sonores / ministère des transports / 1980.
- [15] Sound Propagation at Tunnel Openings / Noise Control Engineering Journal / 1992 / Woehner H.
- [16] Les écrans acoustiques, guide de conception et de réalisation / édition CERTU / 2007.
- [17] Bruit et études routières, manuel du chef de projet / édition CERTU-SETRA / 2001.
- [18] Bruit des chantiers de construction des infrastructures de transports terrestres / édition SETRA / à paraître.

6. POLLUTION DE L'AIR



La quantité totale d'émissions polluantes produite dans un tunnel routier en phase d'exploitation est de nature identique à celle générée par toute voie routière. Elle est proportionnelle au nombre de véhicules et à la distance parcourue, et reste inchangée, tunnel ou pas. Les effets d'un tunnel sur le volume des émissions sont donc limités aux conséquences d'une éventuelle modification des conditions de circulation (vitesse pratiquée par exemple). Les tunnels ont en revanche un impact sur les concentrations, car ils conduisent à des rejets polluants plus localisés.

En phase chantier, les effets caractéristiques à prendre en compte pour un tunnel sont essentiellement les gaz rejetés lors des tirs d'explosifs, les gaz d'échappement des engins et camions ainsi que les envols de poussières dus aux travaux de creusement et aux transports des matériaux.

Les éléments présentés dans la suite de ce document sont pour l'essentiel extraits du guide méthodologique sur les études d'environnement dans les projets routiers, volets "air" et "santé", le cas spécifique des tunnels, à paraître en 2011 [19]. Le cas particulier des tranchées couvertes n'est pas traité de façon séparée car il n'introduit pas de spécificités franches par rapport à celui des tunnels.

TUNNELS ET POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

6.1.1 Une double problématique : air intérieur et air extérieur

La pollution émise sous un tunnel est rejetée en des points bien précis, engendrant ainsi une surconcentration en polluants dans l'environnement localisée :

- aux extrémités du tunnel, points de rejet naturels des émissions en l'absence de dispositif spécifique (Cf. photo 8);
- aux ouvertures complémentaires dans la structure de l'ouvrage, s'il en a ;
- aux bouches ou cheminées d'extraction si l'ouvrage en est pourvu.

Malgré ces échanges avec l'extérieur, un tunnel reste un espace confiné où les gaz émis peuvent devenir toxiques pour la santé des usagers à l'intérieur du tunnel en cas de concentrations importantes. Les poussières en suspension peuvent également affecter la visibilité et la sécurité de ces mêmes usagers.

La problématique de la pollution de l'air liée à un tunnel porte donc à la fois sur l'air intérieur et l'air extérieur.



Photo 8: tunnel d'Uriol sur l'autoroute A51 (source : CETU)

6.1.2 La ventilation sanitaire

Ce document ne s'intéresse pas aux préoccupations de ventilation en cas d'incendie. Ce domaine, qui fait l'objet d'une réglementation très précise, est traité en détail dans le dossier pilote "Ventilation" (CETU, novembre 2003 [20]).

La ventilation, au-delà de son rôle primordial en cas d'incendie, a pour objectif en situation normale d'exploitation de garantir des niveaux de pollution acceptables :

- à l'intérieur du tunnel, en y augmentant la dilution des polluants émis,
- à l'extérieur du tunnel, comme conséquence directe d'une meilleure dilution à l'intérieur du tunnel.

Techniquement, sont distingués trois types de ventilation :

- la ventilation naturelle : pistonnement et turbulences sous l'effet du trafic et des conditions météorologiques,
- la ventilation mécanique longitudinale: poussée de la masse d'air du tunnel vers l'extérieur, sans apport d'air frais autrement que par l'une des deux têtes, l'air vicié étant évacué directement par l'autre tête; le système longitudinal est parfois complété par des extractions ponctuelles dites extractions massives,
- la ventilation mécanique transversale : injection et / ou extraction de l'air à intervalles réguliers dans le tunnel au moyen de gaines de ventilation.



Illustration 15 : système longitudinal - les flèches représentent le mouvement de l'air (source : CETU)



Illustration 16 : système transversal - les flèches représentent le mouvement de l'air avec l'air frais en bleu et l'air vicié en rouge (source : CETU)

De plus en plus fréquemment, la recherche de la maîtrise du courant d'air longitudinal en cas d'incendie conduit à compléter les installations de ventilation de type transversal par des accélérateurs ou des injecteurs. Ces accélérateurs ou injecteurs peuvent être utilisés pour la ventilation sanitaire et ramener ainsi au cas longitudinal (échanges d'air uniquement par les têtes) lorsque l'extraction ne fonctionne pas.

Pour étudier l'impact d'un tunnel sur la qualité de l'air, il est nécessaire de connaître la localisation des rejets, qui dépend étroitement du type de ventilation. A ce titre, on peut retenir les principes généraux qui suivent, les hypothèses de répartition des émissions entre les têtes s'appliquant dès lors que l'on s'intéresse à une période suffisamment longue pour couvrir des conditions d'influence aéraulique variées.

Dans la plupart des cas, les tunnels inférieurs à 300 mètres de longueur ne sont pas ventilés mécaniquement, mais seulement de manière naturelle. Pour un tube monodirectionnel, les rejets peuvent alors être considérés comme entièrement localisés à la tête de sortie, sous l'effet du pistonnement. En cas de circulation bidirectionnelle dans un seul tube, les rejets se répartissent de façon égale entre les deux têtes.

Pour les tunnels à circulation unidirectionnelle de longueur supérieure à 300 mètres, un système longitudinal est souvent retenu. Les rejets peuvent alors être considérés comme localisés à la tête de sortie des véhicules, en l'absence du moins de cheminées d'extraction utilisées pour maintenir des niveaux de pollution acceptables en tunnel. En cas de ventilation transversale, la même hypothèse simplificatrice peut être faite, l'effet naturel de pistonnement dictant le sens d'écoulement de l'air dans le tunnel.

Pour les cas de circulation bidirectionnelle dans des tunnels de longueur supérieure à 300 mètres, c'est plus fréquemment une ventilation transversale qui est appliquée. Toutefois, quel que soit le type de ventilation envisagé, l'hypothèse simplificatrice que les rejets se répartissent de façon égale entre les deux têtes peut être faite (à condition qu'il n'y ait pas de système d'extraction prévu pour fonctionner en ventilation sanitaire).

Les principes précédents constituent une approche très simplifiée. Pour toute étude de ventilation, il faut se reporter à l'instruction technique annexée à la circulaire interministérielle 2000-63 du 25 août 2000 et au dossier pilote "Ventilation" [20].

6.1.3 Les polluants dans les tunnels

Au-delà des niveaux réglementaires distincts entre tunnel et air libre à l'extérieur (*Cf. chapitre 6.6*), la terminologie diffère également. Dans les tunnels, le terme "fumées" est couramment employé pour désigner la pollution particulaire. Cette dernière n'est pas mesurée directement mais à travers l'opacité, exprimée en m⁻¹. L'opacité traduit l'atténuation d'un flux lumineux qui traverse une épaisseur d'air. En mesurant l'opacité, c'est la totalité des particules qui est prise en compte. Il est très difficile d'établir une règle de correspondance avec les concentrations en particules.

Une autre particularité des polluants en tunnel est le comportement des oxydes d'azote très différent entre l'intérieur d'un tunnel et ses abords. En tunnel, le monoxyde d'azote reste prépondérant du fait d'une oxydation limitée. Dans ses recommandations du 14 décembre 1998, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) indique de retenir le ratio de concentration : $NO/NO_2 = 10$. Toutefois, des études récentes ([21]) indiquent que ce rapport tend à diminuer, les technologies de post-traitement des gaz d'échappement favorisant les émissions de dioxyde d'azote.

A l'extérieur des tunnels, le rapport des concentrations NO_2/NO_x augmente en s'éloignant du point de rejet. Le Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Environnement Atmosphérique (CEREA) a développé un modèle simplifié de calcul de ce rapport. La méthode de modélisation est décrite en détail dans le rapport "Estimation de ratios moyens de NO_2/NO_x au voisinage du débouché d'un tunnel en tranchée en milieu urbain" (CEREA, 2004, [22]).

6.1.4 Pollution de l'air en phase chantier d'un tunnel

En phase chantier, un tunnel ne présente pas de particularités importantes par rapport à un chantier de route à l'air libre. La principale nuisance est celle liée à l'envol de poussières du fait de la circulation sur les pistes de chantier ou du fait des travaux de creusement.

Une des particularités d'un chantier de tunnel peut toutefois résider dans l'utilisation d'explosifs dans un espace confiné.

Les nuisances qui en découlent sont avant tout sonores et vibratoires. Parmi les gaz produits lors des tirs, figurent ammoniac (NH₂) et monoxyde de carbone (CO).



Photo 9 : chantier de la tête Nord du tunnel du Lioran (source : CETU)

IMPACTS ET ENJEUX LIÉS À LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

D'une manière générale, les effets de la pollution atmosphérique sont de plusieurs ordres :

- des effets sur la santé des personnes allant d'une simple augmentation des affections respiratoires jusqu'à une incidence sur la mortalité,
- des effets sur la végétation et les rendements agricoles,
- la détérioration du patrimoine par corrosion et salissure,
- la participation à l'effet de serre.

La pollution atmosphérique liée à un tunnel en exploitation n'est que le fruit de la circulation routière qui l'emprunte. Un tunnel conduit ainsi à des rejets polluants localisés à ses extrémités, et le cas échéant, au niveau des points de rejet complémentaires prévus dans l'ouvrage. Hors de ces zones, un tunnel permet de soustraire à l'environnement extérieur la pollution générée par le trafic circulant sous l'ouvrage. A ce titre, les effets permanents d'un tunnel sont :

- des concentrations sous l'ouvrage plus élevées qu'à l'air libre du fait du confinement,
- une diminution, à l'extérieur, des concentrations en polluants au droit du tunnel à l'écart des zones de rejet ;
- une augmentation, à l'extérieur, des concentrations en polluants au voisinage des zones de rejet ;
- un impact sanitaire qui s'analyse au regard des diminutions et augmentations des concentrations précitées.

Le tunnel ne constitue généralement qu'un tronçon d'un projet, qui lui-même ne représente qu'une partie du réseau routier sur lequel porte l'évaluation. Si un tunnel peut amener de la pollution là où aucune route n'était présente, ceci ne signifie pas que son impact est négatif. En premier lieu un tunnel apporte dans sa partie couverte une protection par rapport à une route qui serait construite à l'air libre. En second lieu le projet dans lequel s'insère le tunnel peut conduire à une forte réduction de l'exposition à la pollution le long d'itinéraires délestés.

Un tunnel peut par ailleurs s'accompagner d'une augmentation ou diminution de la contribution à l'effet de serre, selon les modifications de trafic liées à sa mise en service et les modifications des émissions en CO₂ correspondantes.

En phase chantier, les impacts en termes de pollution atmosphérique sont essentiellement ceux liés aux gaz d'échappement des engins et camions, aux poussières dues aux travaux de creusement et aux transports des matériaux. Ces impacts sont temporaires et disparaissent en même temps que le chantier se termine. Un chantier de tunnel peut toutefois avoir une durée longue. Quant à l'utilisation d'explosifs et aux gaz qui peuvent être rejetés, ils n'appellent pas de précautions particulières au-delà de celles nécessaires vis-à-vis de la sécurité du personnel de chantier.

DÉMARCHE D'ÉTUDE "AIR ET SANTÉ"

L'article L122-3 du Code de l'environnement précise que tous les projets nécessitant une étude d'impact doivent établir une étude des effets sur la santé et présenter les mesures envisagées pour supprimer, réduire, et si possible compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement et la santé.

Le contenu du volet "qualité de l'air et santé" de l'étude d'un projet routier est précisé dans la note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières (CERTU et SETRA, février 2005 [23]). Elle prévoit un contenu qui varie selon le niveau

d'étude requis, lui-même assujetti aux données de trafic de l'infrastructure projetée et à la prise en considération de la population exposée (*Cf. tableau 9*).

Le contenu attendu concerne surtout la phase d'exploitation. Pour les aspects propres à la phase chantier, aucune étude spécifique n'est exigée. Il faut néanmoins s'astreindre à bien caractériser l'état initial (*Cf. chapitre 6.4*) et à préciser la liste des impacts prévisibles du chantier et les moyens de les réduire (*Cf. chapitre 6.5*).

T : trafic attendu à l'horizon d'étude sur le projet (selon tronçons homogènes de plus de 1 km) d : densité de population dans la bande d'étude (en hab / km²)	T≤ 10 000 véh/j ou T≤ 1 000 uvp/h	10 000 < T ≤ 25 000 véh/j ou 1 000 < T ≤ 2 500 uvp/h	25 000 < T ≤ 50 000 véh/j ou 2 500 < T ≤ 5 000 uvp/h	T > 50 000 véh/j ou T > 5 000 uvp/h
pas de bâti	IV	IV	III	III
d < 2000	II si $L_{projet} > 50 \text{ km ou}$ III si $L_{projet} \leq 50 \text{ km}$	II	II	I
2 000 < d < 10 000	III si L _{projet} ≤ 25 km ou II si L _{projet} > 25 km	II	II	I
d ≥ 10 000	III si L _{projet} ≤ 5 km ou II si L _{projet} > 5 km	II	I	I

Tableau 9 : définition des niveaux d'étude "air et santé" requis (source : note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières [23])

6.3.1 Les études amont

6.3.1.1 Les études d'opportunité

Au stade de l'étude d'opportunité, le sujet de la qualité de l'air et des tunnels doit être abordé à travers une présentation du projet et un exposé des phénomènes en jeu. Parfois, les enjeux en termes de qualité de l'air sont tels que des informations générales ne suffisent plus. Dans ce cas, une étude simplifiée peut être envisagée selon les étapes successives décrites ci-après :

- le calcul et la répartition des émissions polluantes aux têtes de tunnel : ce calcul, effectué à l'appui des outils présentés au *chapitre 6.4.2*, porte à ce stade sur un nombre limité de polluants (oxydes d'azote, particules et benzène). L'émission à une tête de tunnel peut être prise égale à la moitié des émissions calculées sur la portion d'itinéraire couverte sauf dans le cas d'un tube unique unidirectionnel, où la totalité des émissions est rejetée à la tête de sortie des véhicules.
- la prise en compte de la dilution : en l'absence de données, peut être retenue une vitesse de sortie de l'air du tunnel de l'ordre de 3 m/s d'où un débit d'air sortant du tunnel $Q = 3 \times S$, S étant la section du tunnel. La concentration du rejet C_0 en tête de tunnel pour un polluant donné est : C_0 ($\mu g/m^3$) = Émissions ($\mu g/s$) / Q (m^3/s). En cas de concentration C_0 supérieure à la concentration recommandée dans l'air intérieur des tunnels (Cf. chapitre 6.6), cela signifie qu'en pratique, la ventilation mécanique se met en route. Dans ce cas, la concentration du rejet C_0 peut être prise égale au seuil recommandé. Les concentrations peuvent ensuite être estimées à l'aide de l'outil de calcul simplifié présenté au chapitre 6.4.3.
- une appréciation quant à la sensibilité du projet : le caractère sensible ou non du tunnel s'apprécie en examinant le niveau de pollution de fond, la surconcentration due au tunnel, la surconcentration due à la part de route à l'air libre et les seuils réglementaires. La démarche d'étude simplifiée proposée ici ne prétend en aucun cas refléter des situations très particulières en termes de conditions

météorologiques ou de trafic. En cohérence avec cette démarche, les seuils réglementaires à retenir sont des objectifs de qualité portant sur une moyenne annuelle.

Cette étude simplifiée repose sur des hypothèses toujours défavorables, qui maximisent l'impact du tunnel. Lors des stades ultérieurs d'étude :

- le calcul sera affiné au fur et à mesure que les données du projet et du site seront mieux connues;
- si nécessaire, des mesures seront prises pour qu'il n'y ait pas de dépassement des concentrations admissibles dans l'air ambiant au niveau des habitations les plus proches du projet.

6.3.1.2 Les études préalables à l'enquête publique : la comparaison des variantes

L'objectif de la phase de comparaison des variantes est de dégager, parmi les tracés envisagés, celui qui minimise les impacts sur la qualité de l'air. Le niveau d'étude (*Cf. tableau 9*) influe sur cette phase. Le calcul d'un indice d'exposition de la population à la pollution gazeuse (IPP) est par exemple à mener pour les études de niveaux I et II mais pas pour celles de types III et IV. Pour ces dernières, il est aussi possible de s'appuyer sur une étude simplifiée telle que proposée précédemment au stade de l'étude d'opportunité.

Pour les études de niveau I et II, sont abordés les points suivants :

- le calcul et la répartition des émissions polluantes aux têtes de tunnel : il est mené de la même manière qu'au stade de l'étude d'opportunité mais pour une liste plus complète de polluants (les oxydes d'azotes, le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils, le benzène, les particules émises à l'échappement, le dioxyde de soufre, le nickel et le cadmium) :
- le calcul de dispersion des polluants gazeux : l'augmentation de la concentration moyenne annuelle que risque de provoquer le projet à ses abords immédiats est modélisée à l'aide d'outils spécifiques (*Cf. chapitre 6.4.3*).

• la comparaison des variantes à l'aide d'un indicateur d'exposition de la population à la pollution gazeuse (IPP) : cet IPP est déterminé en croisant les données de population avec celles de concentrations en benzène (Cf. chapitre 6.4.4). Si le choix du benzène ne permet pas de discriminer les différentes variantes, le dioxyde d'azote pourra être utilisé en complément. La composante d'IPP ainsi calculée pour un tunnel doit ensuite être intégrée à l'IPP global relatif au projet dans son ensemble (tunnel et tracé à l'air libre), sur l'aire d'étude. Une fois l'IPP calculé pour chacune des variantes, la variante ayant l'IPP le plus faible est celle qui minimise l'impact du projet vis-à-vis des effets de la pollution gazeuse sur la santé humaine.

6.3.1.3 Les études préalables à l'enquête publique : étude de la variante proposée

L'étude de la variante proposée implique une évaluation des effets du projet. Les effets négatifs doivent être exposés, ainsi que des mesures destinées à y remédier.

Pour les études de types III et IV, la présence d'un tunnel n'entraîne pas d'étude particulière.

Pour les études de type II, le but est d'estimer les concentrations susceptibles d'être atteintes en présence du projet, et de les comparer aux seuils fixés par la loi sur l'air. Il est nécessaire pour cela de mener un calcul de dispersion. La démarche est la même que pour la phase d'étude précédente. Les seules différences sont la nécessaire prise en compte de la pollution de fond pour obtenir un niveau absolu de concentration. L'utilisation de modèles permettant de prendre en compte les réactions chimiques entre oxydes d'azote est souhaitable. Lorsque l'architecture des têtes et leur position est bien connue, la modélisation sur maquette peut être envisagée. Il s'agit notamment des cas de couvertures de voiries existantes.



Photo 10: modélisation sur maquette (source: CETU)

Pour les études de type I, une démarche d'évaluation des risques sanitaires est obligatoire. Elle conduit à retenir une liste de polluants plus exhaustive. Elle peut viser notamment les composés organiques volatils (acroléine, acétaldéhyde, benzène, formaldéhyde, 1,3-butadiène, etc.), le benzo(a) pyrène, le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote, les particules et les métaux lourds (chrome, nickel, cadmium, arsenic, mercure, baryum, etc.).

S'il apparaît que le tunnel risque d'entraîner une dégradation de la qualité de l'air inacceptable aux abords de l'une de ses têtes, il pourra être envisagé des mesures réductrices de son impact, à l'image de celles présentées au *chapitre 6.5*. Si le recours à une cheminée d'extraction est prévu, il conviendra à ce stade d'étude de vérifier la faisabilité de sa mise en place (possibilité de trouver un lieu d'implantation, ordre de grandeur des quantités à extraire pour revenir à un impact acceptable, etc.).

6.3.2 Au stade des études de conception

Le stade du projet ne nécessite normalement que peu d'éléments complémentaires par rapport aux points étudiés lors des phases précédentes. Tout au plus, si comme précisé précédemment le recours à une cheminée d'extraction a été envisagé, son étude approfondie sera réalisée au stade du projet, lorsque le tracé est bien défini. Pour cette étude précise, on utilisera un modèle fin capable de prendre en compte des effets très locaux.

6.3.3 Au stade de l'exécution

En phase travaux, il faudra veiller à la mise en œuvre des moyens de réduction des impacts prévisibles du chantier *(cf. chapitre 6.5)*.

Enfin, le suivi de l'évolution de la qualité de l'air en des points stratégiques de l'environnement du projet peut être envisagé tant en phase chantier qu'en phase d'exploitation.

6.4

MÉTHODES ET MOYENS D'ÉVALUATION

Les méthodes et outils disponibles sont présentés dans ce chapitre selon les quatre étapes techniques successives que comprend généralement une étude de qualité de l'air :

- la caractérisation de l'état initial,
- la détermination des quantités d'émissions rejetées par le tunnel,
- la modélisation de la dispersion des polluants,
- l'étude sanitaire.

Le contenu de chacune de ces étapes varie selon le stade d'avancement des études et selon les enjeux. Si l'étude de la phase exploitation d'un projet de tunnel peut nécessiter la mise en œuvre de ces quatre étapes techniques, l'étude de la phase chantier n'appelle généralement pas la nécessité d'aller au-delà de la caractérisation de l'état initial complétée d'une analyse des impacts prévisibles du chantier et des moyens de les réduire.

6.4.1 L'analyse de l'état initial

L'établissement de l'état initial doit qualifier les enjeux, évaluer les sensibilités et définir les contraintes en l'absence de tout projet d'aménagement, afin d'étudier par la suite les impacts du projet par rapport à cette situation de référence.

Dans le cas d'un tunnel et en termes de qualité de l'air, l'état initial se concentre sur les zones d'implantation des têtes et le cas échéant celles des stations de ventilation. Le CERTU a publié en 2009 un guide méthodologique d'aide à l'établissement de l'état initial : études d'impact d'infrastructures routières, volets "air et santé", état initial et recueil de données [24]. Ce guide décrit dans le détail les éléments disponibles et indispensables à cette phase d'étude.

Une liste indicative des études et outils disponibles, ainsi que des organismes disposant de données utiles en vue de l'état initial est donnée dans le *tableau 10*.

6.4.2 Le calcul des émissions

Dans le cas de projets routiers sans tunnel, c'est la méthodologie COPERT qui est la plus couramment utilisée. Concernant le cas spécifique des tunnels, les données d'émissions proposées par le CETU et l'AIPCR sont *a priori* mieux adaptées mais elles présentent toutefois l'inconvénient de ne pas faire l'objet de mises à jour aussi fréquentes que COPERT. Ainsi, aux stades d'études préalables, même en présence de tunnels, la méthodologie Copert est satisfaisante.

6.4.2.1 Méthodologie Copert

La dernière version de la méthodologie Copert est donnée par le rapport Copert 4 publié par l'Agence Européenne d'Environnement en août 2007. Ce rapport constitue une base de données de facteurs d'émissions unitaires qui dépendent du type de véhicule, du mode de carburation, de la cylindrée et de la date de mise en circulation. Ces facteurs d'émissions ont été déterminés en fonction de la vitesse moyenne à travers des mesures effectuées par plusieurs laboratoires européens sur des cycles cinématiques précis. Des outils spécifiques permettent la mise en œuvre de cette méthodologie.

Éléments	Organismes ou données ressources		
Qualité de l'air	 les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) les documents du type: Plans Régionaux pour la Qualité de l'Air (PRQA) ou futurs Schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie, Plans de Protection de l'Atmosphère (PPA), Plans de Déplacement Urbain (PDU) ou encore Dossiers de Voirie d'Agglomération (DVA) faute d'éléments suffisants, mise en place de campagnes de mesure in situ spécifiques 		
Qualité des sols (pollution des sols par les retombées particulaires)	 Institut National de Recherche Agronomique, Chambres d'agriculture ou DREAL (Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) faute d'éléments suffisants, mise en place de campagnes de mesure in situ spécifiques 		
Météorologie	Météo France		
Occupation du sol, rugosité et topographie	bases de données de l'IGN et de l'INSEE base de données Corine Land Cover		
Recensement des émissions de polluants	• AASQA, DREAL et CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique)		
Données sanitaires	• ARS (Agences Régionales de Santé), ORS (Observatoires Régionaux de la Santé) et CIRE (Cellules Interrégionales d'Épidémiologie).		

Tableau 10 : données utiles en vue de la réalisation d'un état initial de la qualité de l'air (source : CETU)

6.4.2.2 Méthodologie Artemis

Le projet européen Artemis (Assessment and reliability of transport emission models and inventory systems) a débouché sur une nouvelle méthode de calcul des émissions. Les paramètres d'entrée ne reposent plus sur une simple vitesse moyenne, mais sur une approche par "situations de trafic", liées au milieu (urbain, rase campagne), à la catégorie de route (autoroute, voie rapide, route moyenne, réseau local...), aux conditions de trafic (fluide, saturé...), à la vitesse réglementaire et au niveau de trafic. A ce stade, il n'existe pas d'outils simplifiés permettant la mise en oeuvre d'Artemis.

6.4.2.3 Méthodologie du Centre d'Études des Tunnels (CETU)

Cette méthode est décrite dans le document intitulé "Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel" d'avril 2002, disponible auprès du CETU. Les données utilisées sont issues d'études effectuées dans le cadre de différents programmes européens et de mesures spécifiques réalisées par l'INRETS à la demande du CETU. Une nouvelle version est prévue en 2011.

6.4.2.4 Méthode de calcul des émissions de l'Association Mondiale de la Route (AIPCR)

Cette méthode, très proche de celle du CETU, est exposée dans le guide *Tunnels routiers – Émissions des véhicules et besoins en air pour la ventilation des tunnels* de l'AIPCR (Association Mondiale de la Route). Elle fait l'objet d'actualisations régulières.

6.4.3 Le calcul de la dispersion des polluants

L'étude de la dispersion de la pollution est une étape majeure de l'évaluation de l'impact du tunnel sur son environnement. L'enjeu est de décrire le champ de concentrations dans la zone d'impact extérieure au tunnel, où les niveaux de pollution peuvent excéder les seuils fixés par la loi sur l'air. La modélisation doit s'appuyer sur quatre étapes fondamentales :

- la définition précise du cahier des charges de l'étude et le choix de l'outil de modélisation,
- le recueil des données d'entrée : orographie, occupation des sols, météorologie, émissions,
- le calcul de la dispersion et éventuellement de la transformation des polluants,
- l'exploitation des résultats produits.

Contrairement à la plupart des sources usuelles, une tête de tunnel apporte une quantité de mouvement horizontale. L'écoulement est complexe et se caractérise par le rapport entre la vitesse du rejet et une vitesse caractéristique du vent. A cette particularité s'ajoutent les phénomènes habituels de la dispersion atmosphérique.

Avant de choisir un modèle, il est nécessaire de définir le niveau de précision que l'on veut obtenir. A ce titre, une bonne définition des objectifs est primordiale et certains points méritent d'être correctement identifiés :

- polluants visés : gaz ou particules, polluants primaires qui n'interagissent pas avec les autres composants, ou polluants secondaires ;
- nature des sources prises en compte : cheminée de ventilation, tête du tunnel, etc.
- échelle spatiale : étendue du domaine de calcul, qui peut varier de quelques centaines de mètres autour de la source (échelle locale) à quelques dizaines de kilomètres (échelle urbaine);
- niveau de détail dans la description du site (présence d'obstacles ou de bâtiments, complexité du relief, évaluation de la ou des rugosités);
- échelle temporelle : analyse des niveaux chroniques de pollution et/ou analyse du cas le plus pénalisant, pour une ou plusieurs sources de polluants.

6.4.3.1 Modèles numériques et maquettes

Plusieurs modèles permettent d'atteindre tout ou partie de ces résultats. Ils sont présentés et comparés dans le *tableau 11*.

6.4.3.2 Estimation simplifiée

Il est aussi possible d'apprécier grossièrement les concentrations à l'aide d'une estimation simplifiée. En effet, la compilation de résultats sur des maquettes aérauliques a permis de déterminer des valeurs caractéristiques de décroissance des concentrations en fonction de la distance à la tête du tunnel et de la direction par rapport à l'axe du tunnel. Ces données sont synthétisées sur l'illustration 17.

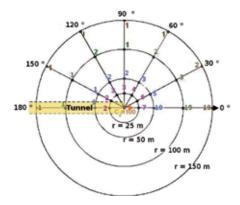


Illustration 17 : décroissance des concentrations, à 3 mètres du sol, dans l'environnement d'une tête de tunnel (vue de dessus) : pour un rejet d'une concentration de 100 μ g/m³, la concentration dans une direction de 30° à 100 m n'est plus que de 3 μ g/m³ auxquels s'ajoute la concentration de fond locale (sources : CETU)

Type de modèle	Avantages	Inconvénients	Coût	Champ d'application
gaussien traditionnel	simple à mettre en œuvre exploitation statistique facile temps de calcul très faible	 approche très simplifiée, pas adapté aux sites complexes à petites échelles, pas de prise en compte de la chimie inadapté en champ proche 	faible	études globales
gaussien sophistiqué	simple à mettre en œuvre exploitation statistique facile possibilité de prendre en compte le relief et certains obstacles en champ proche, prise en compte possible de la chimie temps de calcul modéré	 approche simplifiée problèmes en cas de topographie très complexe (falaises) limitations en champ proche 	faible	recommandé pour les études préalables à la déclaration d'utilité publique
lagrangien	• temps de calcul assez faible	prise en compte de la chimie possible mais complexe	moyen	peu employé à ce jour pour les têtes de tunnels
eulérien (CFD)	possibilité de traitement des écoulements complexes, prise en compte possible de la chimie	lourd à mettre en œuvre utilisation délicate	élevé	réservé aux cas où l'architecture et la position des têtes sont connues de façon précise
maquette	possibilité de traitement des écoulements complexes, fiabilité des résultats	lourd à mettre en œuvre, pas de prise en compte de la chimie	très élevé	réservé aux études très fines

Tableau 11 : avantages et inconvénients des différentes méthodes de modélisation de la pollution atmosphérique (source : CETU)

Cette décroissance des concentrations ne s'applique qu'aux polluants passifs donc exclut le monoxyde d'azote pris seul ou le dioxyde d'azote pris seul. Pour ces derniers, il faut raisonner à partir des oxydes d'azote totaux. Une fois la concentration en oxydes d'azote totaux déterminée au point de calcul repéré, la méthode d'Estimation de ratios moyens de NO_2/NO_x au voisinage du débouché d'un tunnel en tranchée en milieu urbain [22] permet d'évaluer les concentrations en NO_2 .

Rapport NO ₂ /NO _x	Distance d à la tête du tunnel			
angle θ par rapport à l'axe du tunnel	25 m	50 m	100 m	150 m
0°	0,23	0,25	0,31	0,47
30°	0,29	0,48	0,64	0,71
60°	0,34	0,55	0,68	0,72
90°	0,34	0,55	0,67	0,72
120°	0,34	0,51	0,65	0,71
150°	0,28	0,43	0,60	0,71
180°	0,22	0,25	0,44	0,69

Tableau 12 : rapport NO_z/NO_x pour différentes valeurs du couple (d, θ) dans le cas d'une grande agglomération (sources : CEREA et CETU)

La méthode du CEREA donne un ordre de grandeur du rapport NO_2/NO_x en situation moyenne annuelle. Pour cela il faut d'abord caractériser la situation considérée à savoir :

- grande agglomération avec une forte pollution de fond en oxydes d'azote,
- ville moyenne avec une faible pollution en oxydes d'azote.

Ensuite, les valeurs du rapport $\mathrm{NO_2/NO_x}$ sont données, toujours en fonction de la distance à la tête et de la direction par rapport à l'axe du tunnel. A titre d'illustration, le *tableau 12* répertorie les valeurs pour le cas d'une "grande agglomération".

6.4.4 L'étude sanitaire

Son contenu varie selon le niveau d'étude requis (*Cf. tableau* 9). Il est précisé par la *note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières [23]* et va d'informations générales sur le lien entre pollution et santé jusqu'à la réalisation d'une évaluation des risques sanitaires (ERS) selon une démarche formalisée (*Cf. "guide pour l'analyse du volet sanitaire des études d'impact", InVS [25]*)

Un outil intermédiaire à l'ERS, appelé indicateur d'exposition de la population à la pollution (IPP), permet la comparaison des variantes et de leurs tunnels. Il se calcule en multipliant, en chaque point de la zone étudiée, la concentration supplémentaire due au projet par la population présente, puis en sommant sur

l'ensemble des points de la zone étudiée. Ce calcul implique de connaître la concentration supplémentaire due au projet et la population. Il est toutefois assez simple à réaliser au moyen des résultats du modèle de dispersion exploités par un outil d'interpolation et un outil SIG. Le benzène est à retenir pour ce calcul de l'IPP du fait de son classement par l'Organisation Mondiale de la Santé comme polluant "cancérigène certain pour l'homme" et de son caractère prioritaire établi par le Plan National Santé Environnement. Le dioxyde d'azote peut aussi constituer un support pertinent pour la détermination de l'IPP dans la mesure où ce polluant est très représentatif de la pollution routière.

MESURES DE RÉDUCTION DES IMPACTS

Même s'il est fait référence ici aux phases d'exploitation et de chantier, c'est en amont, au stade des études, que les mesures de réduction des impacts doivent être recherchées, leur mise en œuvre ne devenant effective qu'ultérieurement.

6.5.1 En phase chantier

Pour limiter les effets temporaires de la phase chantier, les mesures listées dans le *tableau 13* sont envisageables. En complément et d'une manière générale, la mise en place de plages

horaires adaptées est à rechercher ainsi qu'une démarche de communication et d'information auprès des riverains du chantier.

Concernant l'arrosage des pistes de chantier pour prévenir l'envol de poussières, les pratiques actuelles sont essentiellement empiriques. Dans le cadre de la convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voirie et espace urbain, en date du 25 mars 2009, les entreprises de terrassement se sont engagées à établir des recommandations pour les membres de la profession avec l'ambition de réduire les consommations d'eau.

Impacts	Mesures envisageables
Dispersion de poussières lors d'opérations de mise en œuvre sur un sol naturel sec (terrassements, circulations d'engins et de camions sur l'emprise du chantier)	 fixer la poussière avec de l'eau et arroser les pistes de chantier si les conditions météorologiques favorisent le phénomène (temps sec et venteux), arroser de manière préventive maîtriser les ruissellements éventuellement causés par les opérations d'arrosage
Dispersion lors d'opérations sur les matériaux finis (reprises de béton, découpe de béton ou de bitume à la scie)	 mettre en place sur le chantier une démarche qualité pour limiter les reprises humidifier, si possible au préalable, la zone de travail installer un dispositif d'aspiration ou au moins un déflecteur limitant la dispersion des poussières dans l'environnement
Dispersion des produits pulvérulents	• stocker à l'abri du vent, s'assurer du respect des précautions de transvasement
Dispersion de poussières issues des équipements et des zones de stockage	• choisir opportunément, en fonction des vents dominants et de la sensibilité du voisinage, le lieu d'implantation des équipements ou les zones de stockage de matériaux
Dispersion des produits potentiellement polluants	 protéger la zone de stockage (signalisation, contrôle de la circulation) surveiller les conditions de stockage (identification et intégrité des contenants, respect des consignes de sécurité lors des transvasements)
Dispersion de poussières lors des opérations de transfert, chargement et déchargement de matériaux	 tenir compte des conditions météorologiques bâcher éventuellement les camions et définir des itinéraires pertinents veiller à des déchargements avec précautions respecter la zone définie pour les chargements - déchargements
Émissions de fumées et de poussières	 contrôler les équipements producteurs de fumées et de poussières vérifier la présence de dispositifs de filtration des poussières et fumées mettre en place la couverture éventuelle des stockages dans certaines circonstances (produits fins, temps sec et venteux)
Gaz d'échappement émis par les engins de chantier et les équipements	• s'assurer de la maintenance et de l'entretien des engins et des équipements
Dégagements d'odeurs liés à la mise en œuvre de certains produits ou à la réalisation de certains travaux	 tenir compte des conditions météorologiques (vent) et de la proximité des riverains informer le voisinage de la durée des travaux (étanchéité, revêtement, etc.) et de l'utilisation de produits odorants (peinture)

Tableau 13 : mesures envisageables pour la réduction des impacts de la pollution atmosphérique en phase chantier d'un tunnel (source : CETU)

6.5.2 En phase d'exploitation

Les mesures qui permettent de limiter les incidences négatives du projet en phase d'exploitation sont :

- une réflexion amont pour optimiser le positionnement des têtes de tunnel,
- des mesures de gestion du trafic pour éviter les congestions et optimiser la vitesse des véhicules dont les émissions en polluants sont minimales pour des vitesses de l'ordre de 60 à 70 km/h.
- une bonne gestion du système de ventilation en lien avec les niveaux de pollution mesurés,
- des systèmes d'extraction afin de limiter la sortie de polluants par les têtes lorsqu'elles sont implantées dans des lieux très sensibles,
- le traitement des rejets.

Concernant les deux derniers points, selon le rapport "MANAGING AIR OUTSIDE OF TUNNELS" (Arnold Dix - Counsel at Law, Adj. Professor of Engineering [26]), sur les plusieurs milliers de tunnels existant à travers le monde, moins d'1 % sont équipés d'un système d'extraction dédié à la pollution et moins de 0,01 % d'un système de traitement.

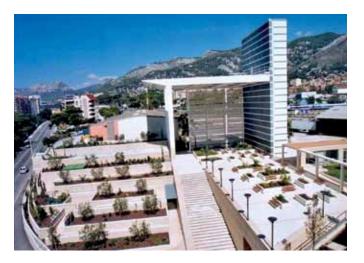


Photo 11 : unité de ventilation UV2 du tunnel de Toulon (source : CETU)

A l'extrémité d'un système d'extraction se trouve généralement une cheminée, dite cheminée de ventilation ou d'extraction. Ces cheminées peuvent être placées en cours de tunnel ou à ses extrémités. En milieu urbain, il est parfois nécessaire de prévoir des cheminées relativement hautes pour permettre une surélévation du panache et en diminuer les impacts. L'implantation des cheminées, leur hauteur et la vitesse des rejets doivent être étudiées pour garantir une dispersion optimale.

Quant au traitement des rejets, solution séduisante souvent évoquée pour réduire les impacts, il est presque toujours d'un faible apport pour une mise en œuvre lourde d'incidences. De telles techniques peuvent néanmoins constituer des solutions d'accompagnement, en sachant toutefois que le recours à une ou plusieurs cheminées d'extraction, sans traitement, permet de diminuer suffisamment l'impact des rejets y compris dans les cas les plus difficiles.

Les techniques proposées en tunnel pour le traitement de l'air diffèrent de celles à l'air libre où les oxydes d'azotes sont préférentiellement visés au travers d'écrans "Dénoxer" notamment. Même si cette technique est aussi expérimentée en tunnel, c'est plutôt le traitement des particules qui est privilégié au travers de dispositifs de filtration. Les tunnels équipés de filtration restent toutefois peu nombreux à travers le monde. Il y en a tout au plus une soixantaine, dont plus des trois quarts au Japon, huit en Norvège et un seul en France (depuis 2010 dans le tunnel du Mont-Blanc). Dans plus de 90 % des cas, les dispositifs de filtration sont utilisés seuls sans être suivis d'un traitement des effluents gazeux. La filtration est en effet souvent utilisée en Norvège ou au Japon afin d'améliorer la visibilité dans les tunnels, visibilité affaiblie par les particules. Les dispositifs de traitement sont en fait rarement utilisés à des seules fins environnementales, sauf pour quelques cas particuliers et notamment des projets récents où les polluants gazeux sont également visés.

Pour plus d'informations sur les techniques de traitement de l'air, on pourra se référer au document suivant : "Le traitement de l'air des Tunnels routiers : état des connaissances sur les études et les réalisations" [27].

6.6

DISPOSITIONS RÉGLEMENTAIRES RELATIVES À LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Le cadre réglementaire de la qualité de l'air découle de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE) du 30 décembre 1996 retranscrite dans le Code de l'Environnement. Elle rend en particulier obligatoire l'étude des effets sur la qualité de l'air et la santé des projets d'infrastructure (article L122-3 du Code de l'Environnement).

La consistance des études à mener dans le cadre des projets routiers est fixée par une note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières [23].

Concernant les niveaux réglementaires des polluants admissibles dans l'air ambiant, donc aux abords des tunnels, ils sont fixés par décret. Les niveaux correspondants ne sont pas rappelés dans le présent document en raison de leur caractère évolutif. Ils sont par ailleurs consultables sur les sites Internet des Associations Agrées de Surveillance de la Qualité de l'Air (par exemple, Airparif). Les polluants ainsi réglementés sont pour l'heure :

- · le dioxyde d'azote,
- le dioxyde de soufre,
- le plomb,
- · le benzène,
- l'ozone.
- · les particules,
- le monoxyde de carbone,
- · les métaux lourds : arsenic, cadmium et nickel,
- · le benzo(a)pyrène.

Enfin, à l'intérieur des tunnels, il n'existe pas de réglementation unique et spécifique. Les valeurs référencées dans le tableau 14 proviennent de la circulaire 99.329 du 8 juin 1999 du ministère de la Santé, de l'instruction technique annexée à la circulaire du 25 août 2000 et de recommandations du CETU. Seuls trois polluants sont visés. Comme les durées d'exposition dans les ouvrages souterrains sont en principe courtes, les limites à ne pas dépasser sont calculées sur des durées réduites, ou même exprimées en seuil instantané à ne pas dépasser.

En phase chantier, la réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) s'applique aux installations spécifiques (centrale à béton, stations de traitement des boues de tunnelier, etc.) tandis que pour les engins de chantier, le décret n°2000-1302 du 26 décembre 2000 instaure une procédure de réception des types de moteurs destinés à être montés sur les engins mobiles non routiers, avant la mise sur le marché des dits moteurs.

Polluant	Paramètre	Durée d'observation	Niveau réglementaire ou recommandé		référence
monoxyde de	en situation d'accident, en tout point du tunnel	valeur instantanée	150 ppm	[171 mg/m³]	instruction technique du 25/08/00
carbone	teneur moyenne sur toute la	15 minutes	90 ppm	[103 mg/m ³]	circulaire du
	longueur de l'ouvrage	30 minutes	50 ppm	[57 mg/m³]	08/06/99
dioxyde d'azote	teneur moyenne sur toute la longueur de l'ouvrage	15 minutes	0,4 ppm	[752 μg/m³]	circulaire du 08/06/99
opocitó	en situation d'accident, en tout point du tunnel	valeur instantanée	9.10 ⁻³ m ⁻¹	1	instruction technique du 25/08/00
opacité	en situation normale, en tout point du tunnel	valeur instantanée	5.10 ⁻³ m ⁻¹	1	recommandation CETU

Tableau 14 : niveaux réglementaires ou recommandés à l'intérieur des tunnels (source : CETU)

QUELQUES RÉFÉRENCES UTILES

- [19] Les études d'environnement dans les projets routiers, volets "air et santé", le cas spécifique des tunnels / CETU / 2011.
- [20] Dossier pilote des tunnels "Ventilation" / CETU / novembre 2003.
- [21] Émissions de dioxyde d'azote de véhicules diesel, Impact des technologies de post-traitement sur les émissions de dioxyde d'azote de véhicules diesel et aspects sanitaires associés / Avis de l'Afsset et rapport d'expertise collective / AFSSET / août 2009.
- [22] Estimation de ratios moyens de NO₂/NOx au voisinage du débouché d'un tunnel en tranchée en milieu urbain (2004-19) / CEREA, Stéphanie Lacour / 2004.

- [23] Note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières / CERTU et SETRA / février 2005.
- [24] Les études d'impact d'infrastructures routières, volets "air et santé", état initial et recueil de données / CERTU / février 2009.
- [25] Guide pour l'analyse du volet sanitaire des étude d'impacts / Institut de veille sanitaire / février 2000.
- [26] MANAGING AIR OUTSIDE OF TUNNELS / Arnold Dix Counsel at Law, Adj. Professor of Engineering / mars 2006.
- [27] Le traitement de l'air des tunnels routiers: état des connaissances sur les études et les réalisations / CETU / septembre 2010.

7. CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET EFFET DE SERRE



Comme l'indique le Centre Interprofessionnel Technique d'Étude de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), "le dioxyde de carbone (CO_2) étant un produit fatal de la combustion, et en l'absence à ce jour de dispositifs de récupération de ce gaz sur les installations de combustion, les émissions suivent l'évolution de la consommation d'énergie fossile. Les rejets de CO_2 liés à l'utilisation de l'énergie représentent de l'ordre de 95 % des émissions totales [28]."

La consommation d'énergie fossile est donc étroitement liée aux émissions de gaz à effet de serre. La contribution à l'effet de serre de l'énergie électrique est plus difficile à interpréter puisqu'elle dépend des filières de production (hydroélectricité, nucléaire, etc.). Sans entrer dans le débat des filières énergétiques les plus pertinentes, il sera fait essentiellement état dans la suite de ce chapitre de la notion de consommation

d'énergie avec l'idée qu'une moindre consommation signifie des gains en termes d'effet de serre quelle que soit la source d'énergie considérée.

En la matière, les engagements issus du Grenelle de l'environnement sont clairs. "La France doit se placer dès maintenant sur la trajectoire d'une division par quatre de ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 [...]. Ceci suppose d'imaginer un modèle de développement totalement différent qui réduise aussi les besoins en énergie. L'étape de 2020, fixée par le Conseil européen : réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre ou 30 % en cas d'engagements d'autres pays industrialisés, baisse de 20 % de la consommation d'énergie, et proportion de 20 % des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie, se situe sur une trajectoire d'amélioration radicale de l'efficacité énergétique."

SPÉCIFICITÉS DES TUNNELS VIS-À-VIS DE L'ÉNERGIE

7.1.1 En phase exploitation

L'exploitation d'un tunnel repose sur le fonctionnement d'équipements spécifiques tels que la ventilation, l'éclairage, la signalisation, la vidéosurveillance, etc. qui contribuent à la sécurité de l'ouvrage. La nature des équipements nécessaires varie selon chaque tunnel et les exigences de sécurité qui l'entourent : tous les tunnels ne renferment pas tous les équipements cités. Ces équipements sont autant de sources de consommation d'énergie avec pour principaux postes la ventilation et l'éclairage. La quasi totalité des équipements correspondants fonctionne en utilisant de l'énergie électrique.

7.1.1.1 La ventilation

La ventilation recouvre différents aspects :

- la ventilation sanitaire qui selon les tunnels fonctionne plus ou moins longtemps dans la journée, à des régimes variables, et durant un nombre de jours plus ou moins important dans l'année;
- la ventilation de désenfumage dont la mise en action reste exceptionnelle et limitée aux essais périodiques ou aux incendies;
- la ventilation des issues de secours qui en mode courant assure leur renouvellement d'air et qui en cas d'incendie permet leur mise en surpression; les issues peuvent être ventilées avec l'appui de ventilateurs communs à plusieurs issues déportés dans des locaux techniques, ou bien chaque issue peut être ventilée localement à l'aide d'un dispositif dédié. Enfin, il est possible d'avoir un système dissociant le fonctionnement courant (renouvellement d'air des issues) et le fonctionnement accidentel (mise en surpression);
- la **ventilation** liée au renouvellement d'air et à la climatisation des différents **locaux techniques**.

7.1.1.2 L'éclairage

L'éclairage recouvre :

- l'éclairage de sécurité : de faible puissance, il doit fonctionner même en cas de coupure électrique. Il est en général assuré par le régime "nuit réduit" de l'éclairage de base ;
- l'éclairage d'évacuation : de faible puissance, il fonctionne en permanence et permet la signalisation de l'itinéraire piéton de mise en sécurité en cas d'urgence ;
- l'éclairage de base : sur toute la longueur du tunnel, d'une puissance inférieure à celle de l'éclairage de renforcement; il n'existe pas pour les tunnels courts; il fonctionne de nuit comme de jour selon trois régimes : "jour", "nuit" et "nuit réduit";

- l'éclairage de renforcement : il nécessite une forte puissance pendant les heures de jour toute l'année :
 - > en entrée de tunnel pour l'accommodation de l'œil du conducteur aux conditions de luminosité plus faible,
 - > en sortie de tunnel quelquefois, en cas de risque d'éblouissement.

Le besoin en éclairage de renforcement varie donc selon les conditions d'ensoleillement et la vitesse d'entrée dans le tunnel. Pour l'instant, la plupart des installations fonctionnent avec deux niveaux d'éclairage en fonction des conditions d'ensoleillement seulement : jour couvert et plein soleil. Des recherches et expérimentations sont en cours afin de piloter cet éclairage par une variation continue. L'objectif annoncé est d'optimiser la consommation d'énergie aux besoins de l'usager avec un niveau asservi de façon continue aux conditions d'ensoleillement et à la vitesse pratiquée. En outre, des progrès ont d'ores et déjà été réalisés par une optimisation du calepinage des luminaires et de leur puissance.

7.1.1.3 Les autres équipements de sécurité

Les éclairages de base et de renforcement ainsi que la ventilation sont *a priori* les équipements qui appellent le plus de puissance (*Cf. tableau 15*).

Les autres équipements de sécurité (automatismes, caméras, détection automatique d'incident, barrières d'arrêt, signalisation, plots de jalonnement, mise en surpression du réseau de lutte contre l'incendie, etc.) ont une puissance appelée plus faible mais fonctionnent pour la plupart en permanence.

Bilan de puissance	Alimentation normale	Alimentation secourue, onduleur(s)
Éclairage de base	24	8
Éclairage de renforcement	135	0
Fonctionnement de la ventilation de désenfumage et sanitaire	540	0
Divers	142	62
Puissance totale (normale + secourue)	771	70

Tableau 15 : bilan des puissances appelées (en kVA) pour le tunnel du Lioran, long de 1515 mètres : le désenfumage pèse très lourd en puissance installée (ce constat n'est pas vrai en termes de consommation puisque le désenfumage fonctionne heureusement très rarement alors que les équipements secourus par onduleur sont alimentés 24h sur 24, 365 jours par an)

7.1.1.4 Le pompage

L'inscription d'un tunnel dans une nappe phréatique ou dans un massif drainant peut conduire à ce que des pompages réguliers soient entrepris pour évacuer les arrivées d'eau, représentant ainsi une consommation en énergie. "Dans une installation de pompage, les puissances installées sont importantes mais, le plus souvent, les quantités d'eau à évacuer sont faibles et de fait les pompes sont peu utilisées. Pour des ouvrages équipés de pompage, la consommation de cet équipement est inférieure à celle de la ventilation sanitaire." [29]

7.1.2 En phase chantier

Lors de la phase chantier d'un tunnel, on retrouve des consommations d'énergie liées à l'éclairage, à la ventilation et au pompage.

Les spécificités d'un chantier de tunnel vis-à-vis de la consommation d'énergie peuvent aussi résider dans l'utilisation de machines particulières pour le creusement (tunneliers, machines à attaque ponctuelle, etc.) et dans le transport des déblais. Cette consommation d'énergie s'accompagne d'une consommation d'énergie moins visible, l'énergie consommée en amont pour la fabrication des entrants et leur transport.

A ce titre, l'utilisation d'acier et de béton se montre très pénalisante, leur fabrication étant très énergivore.

Une analyse cohérente de la consommation énergétique mériterait donc de reposer sur une Analyse de Cycle de Vie (ACV) de l'ouvrage. Il s'agit d'une méthode d'évaluation des impacts potentiels d'un produit ou d'une activité sur l'environnement, de l'extraction de ressources naturelles jusqu'à son élimination en fin de vie. Dans la pratique, les flux de matière et d'énergie entrants et sortants à chaque étape du cycle de vie sont inventoriés. Ensuite, il est procédé à l'évaluation des impacts environnementaux de chacun de ces flux. A ce titre, il est en particulier possible d'individualiser la quantité d'énergie consommée (hors trafic dans l'ouvrage).

Il n'y a pas pour l'heure d'obligation réglementaire à réaliser des ACV pour les projets de tunnel. Tout au plus, des premières études dans ce sens ont été menées dans le cadre de travaux de recherche. C'est le cas au CETU où les premiers résultats, à prendre avec de grandes précautions compte tenu du caractère novateur et expérimental de l'application d'une ACV à un tunnel, indiqueraient que la phase construction est loin d'être négligeable même au regard d'une durée d'exploitation conséquente de l'ordre d'une centaine d'années. Dans ce calcul, l'exploitation recouvre le fonctionnement des équipements tandis que le trafic transitant sous l'ouvrage n'est pas intégré. Les travaux méritent approfondissement.

7.2 IMPACTS ET ENJEUX LIÉS À LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET À L'EFFET DE SERRE

La recherche d'une consommation d'énergie moindre s'inscrit dans un contexte d'engagement national avec le Grenelle de l'environnement, et européen avec le plan énergie-climat. Elle est par ailleurs étroitement liée à la problématique du réchauffement climatique et des émissions de gaz à effet de serre. Pour ces raisons, elle constitue un enjeu majeur.

Au-delà de son impact sur l'environnement, la question de la consommation d'énergie est aussi à rapprocher de celle des coûts. L'énergie a un coût et la réduction des consommations représente aussi pour le maître d'ouvrage et l'exploitant une réduction des coûts (*Cf. tableau 16*).

Enfin, compte tenu de la montée des préoccupations liées aux thèmes environnementaux, profiter de chaque projet pour innover et progresser sur ces thèmes est bénéfique pour l'image du projet vis-à-vis des riverains et usagers.

Type d'ouvrage	Coûts TTC d'exploitation annuels en énergie
Tunnel interurbain bidirectionnel (L = 0,35 km)	13 303 € (196 304 kWh)
Tunnel interurbain bidirectionnel (L = 1,4 km)	14 790 €
Tunnel interurbain bidirectionnel (L = 4,8 km)	145 700 € (2 118 000 kWh)
Tunnel interurbain autoroutier à deux tubes unidirectionnels(L = 0,8 km)	52 124 € (819 782 kWh)
Tunnel interurbain autoroutier à deux tubes unidirectionnels (L = 3,2 km)	101 337 € (1 659 363 kWh)
Tunnel urbain autoroutier à deux tubes unidirectionnels (L = 0,9 km)	43 500 €
Tunnel urbain autoroutier à deux tubes unidirectionnels (L = 1,4 km)	121 761 € (1 794 595 kWh)
Tunnel urbain autoroutier à deux tubes unidirectionnels (L = 2,5 km)	134 500 €
Tunnels urbains à deux tubes unidirectionnels avec une longueur cumulées des tubes de 18,2 km	904 000 €
Tunnel transfontalier bidirectionnel (L=12,9 km)	1 264 383 € (16 504 143 kWh)

Tableau 16 : exemples de coûts d'exploitation et de consommations électriques (source : CETU [29])

DÉMARCHE D'ÉTUDE

Plusieurs grands choix techniques ont des répercussions sur la consommation d'énergie sans pour autant que les contraintes du chantier ne laissent beaucoup de latitude. Il en est ainsi du choix de la méthode de creusement, grandement liée aux contraintes géotechniques du site, à l'évacuation des déblais ainsi qu' au potentiel de réemploi de ces derniers.

Dans le déroulement des études, ces grands choix se font au stade des études amont, ils concernent aussi les équipements du tunnel avec par exemple :

- le nombre de stations de ventilation,
- le nombre de points d'alimentation électrique (point à chaque tête ou non, points intermédiaires),
- les principes d'éclairage: paralume aux têtes pour réduire l'éclairage de renforcement, interaction du choix de la chaussée avec l'éclairage,
- · etc.

Il est donc opportun, dès le stade amont, de rechercher des ordres de grandeur sur les consommations d'énergie. A terme, des démarches de type ACV devraient se multiplier et fournir des éléments sur le poids énergétique "du berceau à la tombe" des grands choix techniques.

Pour l'heure, les réflexions fines sur la consommation d'énergie n'interviennent qu'au stade des études de conception avec la mise en œuvre de bilans de puissance. Ces derniers visent en particulier à dimensionner les alimentations en électricité à installer. Pour aller plus loin, il est aussi utile de se poser la question de la puissance qui sera réellement consommée et de chercher à la limiter par le choix du matériel et des grandes options dans l'architecture des réseaux (électricité, ventilation et éclairage notamment).

MÉTHODES ET MOYENS D'ÉVALUATION

7.4.1 Analyse de cycle de vie

La plupart des thématiques abordées dans ce document ont des répercussions au niveau local, dans l'environnement proche et direct de l'ouvrage (bruit, pollution des ressources en eau impactées par l'ouvrage, pollution de l'air aux têtes, vibrations, etc.). L'analyse de cycle de vie (ACV), déjà présentée au *chapitre 7.1.2*, ne répond pas à ces préoccupations très locales : les pollutions de l'eau et de l'air n'y sont intégrées qu'au travers de bilans globaux d'émissions. Elle permet en revanche de prendre en compte l'impact global sur l'environnement. Elle est donc particulièrement adaptée pour des thématiques telles que la consommation d'énergie ou encore les émissions de gaz à effet de serre (GES). Pour cette thématique des GES, elle repose en fait sur les mêmes principes que la méthode plus connue du Bilan Carbone®.

Réaliser une ACV nécessite de disposer du bilan environnemental des différents matériaux mis en œuvre. Ceci peut être obtenu au travers des fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES).

L'ACV est un outil normalisé au niveau international, notamment au travers des *normes ISO 14040 et ISO 14044 (Cf. chapitre 7.6).*

7.4.2 Bilan de puissance et suivi du fonctionnement des équipements

Les installations électriques sont dimensionnées à l'aide d'un bilan de puissance. Ce dernier consiste dans un premier temps à déterminer la puissance individuelle nécessaire au fonctionnement de chaque équipement. Ensuite, la puissance totale nécessaire est déterminée en sommant les puissances individuelles des équipements susceptibles de fonctionner en même temps. La puissance installée est donc souvent importante et dimensionnée pour des événements rares.

Mieux gérer son énergie, c'est d'abord avoir conscience de ses consommations. A ce titre, il est indispensable de prévoir une installation permettant le suivi des consommations par famille d'équipements. Il faut pour cela prévoir un tableau général basse tension avec un jeu de barres spécifique à chaque poste à suivre et un compteur sur chaque jeu de barres.

Ce suivi est à compléter par un suivi des durées et horaires de fonctionnement des équipements et de leur réponse vis-à-vis des capteurs qui conditionnent leur fonctionnement (luminancemètre pour l'éclairage de renforcement, capteur de pollution pour la ventilation, etc.). Seule la mise en place de tels outils peut permettre d'identifier les postes consommateurs et de mener une réflexion sur la réduction de leur consommation.

7.5

MESURES DE RÉDUCTION DES IMPACTS

La maîtrise des consommations relève souvent du bon sens mais nécessite comme indiqué précédemment de disposer d'outils de suivi.

Parmi les règles de bon sens, il est utile de veiller au paramétrage du fonctionnement des dispositifs. Il est par exemple inutile de climatiser à 21°C là où 25°C suffiraient. Il est même parfois inutile de climatiser. On privilégiera plutôt un renouvellement mécanique, voire naturel, de l'air. Il ne s'agit pas non plus de tomber dans l'excès et de négliger les conditions de fonctionnement des équipements : la durée de vie des batteries au plomb étanches (donnée pour 20°C) est diminuée de moitié si la température ambiante passe à 25°C.

Le choix des techniques et des matériels peut également être éclairé par des préoccupations énergétiques avec par exemple :

- le choix des techniques d'éclairage : symétrique ou contre flux.
- le choix des lampes : sodium haute pression ou fluorescentes.

Lors du choix des types de sources, l'un des critères importants est le ratio "lumen/watt" (plus ce ratio est élevé plus la lampe fournit de lumière pour 1 Watt consommé). Ce ratio est habituellement supérieur à 100 lumens/Watt pour les sources utilisées en tunnel. A noter qu'actuellement les sources LED ont un ratio lumen/watt de l'ordre de 70 lumens/Watt.

Les divers équipements présents dans un tunnel ont des durées de vie très différentes. Elles peuvent aller de quelques années (matériels électroniques et informatiques) à plusieurs dizaines d'années (équipements de type électromécanique). Il y a donc tout intérêt à avoir une réflexion sur le poids énergétique, la durée de vie et la fin de vie des matériaux (recyclage). Le tableau ci-après indique des durées de vie pour plusieurs types d'équipements. Les valeurs fournies sont des moyennes adaptées au cas des tunnels, moyennes autour desquelles des variations importantes sont possibles. Enfin, les conditions dans lesquelles travaillent les équipements ainsi que les sollicitations qu'ils subissent ont une influence importante sur les durées de vie.

Le choix des matériels peut vite se révéler technique. Il n'est pas toujours nécessaire de cibler un produit spécifique dans la rédaction des marchés. Il est plus simple de raisonner par performance, en définissant par exemple des rendements minimaux.

Grâce aux dispositions de l'article 53 du Code des Marchés Publics, les critères de sélection des offres peuvent se baser sur des considérations environnementales et donc en particulier la consommation d'énergie. Ces "critères ainsi que leur pondération ou leur hiérarchisation sont indiqués dans l'avis public d'appel à la concurrence ou dans les documents de la consultation".

Le critère de protection de l'environnement doit être clairement précisé de manière à ne pas induire de pouvoir discrétionnaire.

Famille	Sous-ensemble	Durée de vie moyenne en années	Remarque(s)
Alimentation/	Cellules 20 KV	25	
distribution	Transformateurs	30	
électrique	Câbles	30	
	Groupe électrogène	25	Révisions intermédiaires
Alimentation	Onduleur	15	
de secours	Batterie plomb étanche	5	
	Batterie nickel- cadmium	20	
	Luminaires	20	
Éclairage	Chemins de câbles	20	
	Boîtes de dérivation	20	
	Accélérateurs	15	Révisions intermédiaires
Ventilation	Ventilateurs en station	25	Y compris équipements annexes (registres, insonorisation)
Pompage	Pompes	20	
	Capteurs de pollution	10 à 15	Suivant le type d'équipement
Gestion technique	Capteurs de luminance	15	
centralisée	Automates	10	Peuvent être obsolètes au bout de 5 à 6 ans
Télé- surveillance	Caméras	15	Peuvent être obsolètes au bout de 8 à 10 ans
	Moniteurs	10	
	Boucles de comptage	10	
Signalisation	Panneaux fixes	20	
	Panneaux variables	15	
	Postes en tunnel	15	
Téléphonie	Poste centralisateur	25	
Dadio	Câble rayonnant	20	
Radio retransmission	Émetteurs	15	
	Antennes	20	

Tableau 17 : durée de vie pour plusieurs types d'équipements (source : CETU [30])

DISPOSITIONS RÉGLEMENTAIRES OU NORMATIVES

La consommation d'énergie fait partie des thèmes à traiter dans l'étude d'impact d'un projet routier. L'article L122-3 du Code de l'environnement précise que "[...] pour les infrastructures de transport, l'étude d'impact comprend une analyse des coûts collectifs des pollutions et nuisances et des avantages induits pour la collectivité ainsi qu'une évaluation des consommations énergétiques résultant de l'exploitation du projet, notamment du fait des déplacements qu'elle entraîne ou permet d'éviter".

Les engagements du Grenelle et les lois qui en découlent visent spécifiquement la consommation d'énergie. La loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement a vocation à assurer "un nouveau modèle de développement durable qui respecte l'environnement et se combine avec une diminution des consommations en énergie, en eau et autres ressources naturelles". Pour cela, elle cible des domaines tels que la construction et les transports en général sans viser des ouvrages tels que les tunnels en particulier.

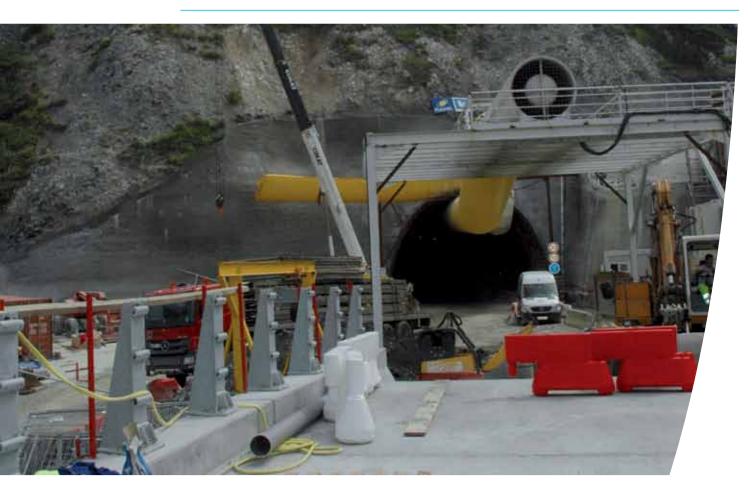
Enfin, citons quelques normes en lien avec l'Analyse de cycle de vie :

- la norme ISO 14040 "Management environnemental -Analyse du cycle de vie - Principes et cadres" qui fait une description des caractéristiques essentielles de l'ACV et des bonnes pratiques de conduite d'une telle étude;
- la norme ISO 14044 "Management environnemental -Analyse du cycle de vie – exigence et lignes directives" qui spécifie les exigences et fournit les lignes directrices pour la réalisation d'une ACV;
- la norme NF P01-010 qui traite des caractéristiques des produits de construction et des fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) qui précisent les conditions de mise en œuvre des produits de construction;
- la norme NF P01-020 qui dégage les grandes lignes du consensus français en matière de qualité environnementale des bâtiments.

7.7 QUELQUES RÉFÉRENCES UTILES

- [28] Émissions dans l'air en France, substances relatives à l'accroissement de l'effet de serre / CITEPA / mise à jour de mai 2009.
- [29] Guide pour la maîtrise des coûts de fonctionnement des tunnels routiers / CETU / août 2005.
- [30] L'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSOA), fascicule 40 / CETU / juin 2011.
- [31] Guide de la fourniture de l'énergie électrique en tunnel / CETU / janvier 2002.

8. GESTION DES MATÉRIAUX ET DÉCHETS



Le creusement d'un tunnel ou la mise en œuvre d'une tranchée couverte génèrent de grosses quantités de matériaux d'excavation. A ces matériaux, s'ajoutent des déchets inhérents à tous travaux et d'autres plus spécifiques aux tunnels ou tranchées couvertes.

Une fois en phase d'exploitation, les déchets produits sont essentiellement liés au renouvellement des équipements et aux travaux de rénovation ou d'entretien. Le volume et la nature des déchets ainsi produits sont très variables.

L'un des premiers fondements d'une bonne gestion de ces déchets et matériaux est la limitation à la source de leur production qui peut se traduire par :

- · l'éco-conception des ouvrages,
- le choix raisonné de produits moins nocifs pour l'environnement.

L'anticipation de la gestion des matériaux de déblai permet d'identifier *a priori* des solutions techniques favorisant leur réemploi et/ou valorisation tout en y intégrant les coûts associés. A ce titre, les phases d'études du projet jouent un rôle déterminant puisque ce sont elles qui fournissent un diagnostic pertinent permettant d'anticiper au mieux le déroulement du chantier.

Le groupe de travail n°35 de l'AFTES (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain) a publié en février 2007 dans la revue *Tunnels et Ouvrages Souterrains n°199* une recommandation *sur la gestion et la valorisation des matériaux d'excavation [32]*. Cette recommandation traite en particulier des aspects réglementaires, des principes généraux de la gestion et de la valorisation des matériaux. Certaines parties du présent chapitre concernant les déblais font référence à ce travail sous l'intitulé "GT35".

MATÉRIAUX ET DÉCHETS PRODUITS EN TUNNEL

8.1.1 Les matériaux d'excavation en phase chantier

Les chantiers de construction de tunnel génèrent en moyenne, par tube, de l'ordre de 100 $\rm m^3/ml$ de déblais soit environ 200 à 250 tonnes par mètre.

Ces déblais sont de nature variable et peuvent être pour partie réutilisables au sein du projet. Certains peuvent ainsi s'avérer appropriés à la production de granulats de béton ou d'autres à la mise en œuvre de remblais.

La fraction réutilisée au sein du projet ne constitue pas a priori un déchet puisqu'au sens de l'article L541-1 du Code de l'environnement, est un déchet "toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire."

8.1.2 Les déchets des entreprises en phase chantier

En phase chantier, les entreprises génèrent des déchets spécifiques à leurs activités. La nature de ces déchets varie selon les phases du chantier. Peuvent être cités en particulier :

- lors des opérations de revêtement : béton, peinture, etc.
- lors de l'installation des équipements : acier, câbles électriques, etc.
- lors du creusement, les déchets des entreprises peuvent être intimement mêlés aux matériaux d'excavation avec :
 - > la présence de fluidifiant ou respectivement de bentonite en cas de creusement au tunnelier par machine à pression de terre ou respectivement à pression de boue,
 - > la présence de morceaux d'explosifs, de détonateurs, de morceaux d'acier et de ferraille en cas de creusement à l'explosif; ces mêmes explosifs apportent des nitrates susceptibles d'être ultérieurement diffusés dans le milieu naturel.

8.1.3 Les déchets en phase d'exploitation

L'une des spécificités des tunnels réside dans les équipements que l'on y trouve :

• les équipements électriques pour les besoins en ventilation et en éclairage notamment : alimentation électrique, armoires électriques, transformateurs et batteries, chemins de câbles, câbles, etc.

- le matériel informatique,
- les équipements radio et vidéo à base d'électronique,
- les équipements d'exploitation et de sécurité (signalisation, ventilation, éclairage, etc.).

Ces équipements sont une source de déchets lors de leur renouvellement.

On peut distinguer l'exploitation courante et les opérations de rénovation lourde.

En exploitation courante, les deux postes de déchets importants sont les sources lumineuses (changées environ tous les 3 à 4 ans) et les batteries des onduleurs (changées tous les 5 à 6 ans environ).



Photo 12 : armoire électrique au tunnel du Lioran (source : CETU)

Dans les cas d'opérations de rénovation lourde, des volumes particulièrement importants de déchets peuvent être produits. Ces déchets peuvent être très variés, allant d'enrobés dans le cas de travaux sur la chaussée à divers matériaux et produits (métaux, béton, matériaux synthétiques, ampoules, etc.) dès lors que l'on touche aux équipements (*Cf. exemple proposé au chapitre 8.5.2*). Il est impossible d'être exhaustif sur la nature et le volume des déchets tant les situations peuvent être variées. Dans le cadre de rénovation lourde des équipements du tunnel, tous les équipements sont concernés.



Photo 13: câbles sous fourreaux au tunnel du Lioran (source: CETU)

A noter que les équipements que l'on trouve en tunnel se retrouvent pour beaucoup dans de nombreux domaines industriels (alimentation électrique, éclairage, télésurveillance, contrôle-commande centralisé, etc.). De fait, le retraitement de ces équipements fait l'objet de textes spécifiques.

Enfin, il est à noter le cas particulier des transformateurs au PCB (polychlorobiphényle) qui font l'objet d'un plan national d'élimination en date du 26 février 2003. Ce dernier prévoit l'élimination des appareils contenant du PCB au plus tard le 31 décembre 2010.

8.1.4 Conclusion sur les déchets liés aux tunnels

Si les quantités de matériaux d'excavation liés au creusement pourront être facilement estimées, il existe toutefois peu de données sur les autres déchets en tunnel tant concernant les phases de construction que celles d'entretien et d'exploitation. Pour ces autres déchets, même s'il apparaît relativement simple de lister les principales catégories susceptibles d'être produites sur un chantier ou lors d'une opération d'entretien, il est plus difficile d'estimer les quantités produites.

IMPACTS ET ENJEUX LIÉS À LA GESTION DES DÉCHETS

Les déchets se classent en trois catégories :

- les déchets inertes, qui "ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine" (Directive Européenne 1999/31/CE du 26 avril 1999),
- les déchets non dangereux : déchets ni inertes ni dangereux pour l'environnement ou la santé,
- les déchets dangereux, qui contiennent des substances dangereuses pour l'environnement ou la santé.

Que le tunnel soit en phase de construction ou en phase d'exploitation, la production de ces déchets est essentiellement liée à la notion de travaux.

En phase de construction, face aux matériaux d'excavation, les principaux enjeux sont :

- la valorisation et le recyclage,
- le stockage en zone de matériaux excédentaires,
- l'acheminement en installation de stockage.

Le premier objectif du projeteur sera de produire des matériaux réemployables au sein du projet. Lorsque ce n'est pas possible,

il appartient au maître d'ouvrage d'impliquer tous les acteurs concernés par l'emploi de déblais d'excavation. Dans tous les cas, afin de limiter les volumes et la durée des mises en dépôt temporaires, une réutilisation rapide est recherchée.

Il est à noter que les matériaux d'excavation ne doivent pas être considérés comme inertes dès lors qu'ils sont marqués par les techniques de creusement (présence de fluidifiant, de morceaux d'explosifs, de détonateurs, de nitrates, etc.) et nécessitent des traitements spécifiques avant utilisation.

Dans le cadre de la convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voirie et espace urbain, en date du 25 mars 2009, les entreprises de terrassement se sont fixées pour objectif de réemployer ou valoriser, à l'horizon 2020, 100 % des matériaux géologiques naturels excavés sur les chantiers et à éviter de recourir à des emprunts ou carrières extérieurs aux projets.

Pour les autres déchets relatifs à la construction, les principaux enjeux sont la valorisation, le traitement et l'élimination.

En phase d'exploitation, la gestion et la valorisation des déchets relèvent une démarche qui n'est pas à proprement parler nouvelle. Il faut toutefois veiller à ce que sa mise en œuvre s'inscrive dès les premières phases d'études des travaux visés compte tenu des rôles et responsabilités partagés de chacun.

La notion de responsabilité est liée à celle de producteur du déchet. Cette dernière peut dépendre du type de chantier et de marché :

- les résidus engendrés par l'ouvrage, de par sa conception, qui sont sous la responsabilité du maître d'ouvrage et dont la gestion peut être confiée contractuellement à l'entreprise;
- les déchets engendrés par l'activité de l'entreprise pour réaliser un ouvrage ou des travaux d'entretien confiés par un maître d'ouvrage. Ces déchets de fonctionnement (chutes, emballages, etc.) sont plutôt de la responsabilité de l'entreprise. La responsabilité est du moins partagée mais pas exclusive.

L'article L541-2 du Code de l'Environnement stipule que : "tout producteur ou détenteur de déchets est responsable de la gestion de ces déchets jusqu'à leur élimination ou valorisation finale, même lorsque le déchet est transféré à des fins de traitement à un tiers". Cet article montre que la notion de propriété n'est pas déterminante pour définir la responsabilité : il faut considérer les notions de producteur et de détenteur et tous les intervenants de l'acte de construire sont donc concernés et doivent s'impliquer dans l'élimination des déchets. Ces responsabilités sont rappelées dans une circulaire du 15 février 2000 (ministères de l'Écologie et de l'Équipement) relative à la planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics.

Les maîtres d'ouvrage doivent en particulier prévoir les moyens nécessaires et notamment contractuels et financiers pour confier la gestion des déchets aux entreprises.

DÉMARCHE D'ÉTUDE

Ce chapitre ne traite pas des travaux de rénovation ou d'entretien de tunnel, qui selon leur nature peuvent conduire à la production de déchets très variés en fonction des équipements désinstallés.

On peut noter toutefois que pour ces chantiers, il est important que le maître d'ouvrage ait réalisé un diagnostic préalable permettant d'identifier clairement, avant même de commencer la consultation pour un marché, les quantités et la nature des équipements à désinstaller que l'entreprise va trouver sur le site en exécutant les travaux. Les emplacements des équipements doivent figurer sur un plan indicatif, ainsi que les quantités correspondantes. Cette identification préalable présente un grand intérêt, car elle permettra aux entreprises de faire des offres intéressantes. L'identification des quantités et des familles de déchets doit se faire dans le cadre d'un dossier annexé au CCTP, et constituera une pièce contractuelle du marché.

Pour les chantiers de construction de tunnel, objet du présent chapitre, les études se concentrent dans leurs phases amont sur la gestion des matériaux d'excavation compte tenu des volumes importants mis en jeu.

8.3.1 Les études amont

8.3.1.1 L'étude d'opportunité

A ce stade très amont, la prise en compte de la gestion des déchets se concentre autour de la problématique des matériaux d'excavation et de leur réutilisation. Il s'agit donc d'apprécier la nature, la qualité et la quantité de ces matériaux au regard :

- de la coupe géologique et géotechnique prévisionnelle décrivant les propriétés intrinsèques des matériaux,
- de l'interaction entre le mode de creusement envisagé et son impact sur la qualité du matériau extrait (forme des matériaux, granulométrie, physico-chimie, caractéristiques mécaniques, etc.),
- des éléments relatifs à des utilisations antérieures de matériaux analogues dans la région.

8.3.1.2 Les études préalables à l'enquête publique

Les reconnaissances géotechniques permettent d'affiner l'analyse et de disposer pour chacun des matériaux rencontrés :

- des volumes excavés,
- des types d'applications envisageables selon les caractéristiques intrinsèques des matériaux comparées à des classifications normalisées (Cf. annexe III du GT35, [32])

- de l'effet de chacune des différentes méthodes d'extraction possibles sur :
 - > les caractéristiques des matériaux après extraction et les possibilités résiduelles d'utilisation,
 - > les traitements supplémentaires susceptibles d'améliorer ces caractéristiques,
- des cadences d'extractions envisageables et des modes de transports de matériaux associés.

Pour cette phase d'étude, le GT 35 [32] recommande en particulier de mettre en œuvre les trois points suivants :

- "une analyse comparative méthodologique d'extraction / utilisations potentielles, faisant clairement apparaître les avantages et les inconvénients liés à chaque méthode en fonction des enjeux attendus en termes d'utilisation, de coûts et de politique d'environnement,
- la définition d'objectifs de valorisation des matériaux issus du gisement géologique du tunnel, à partir de l'option d'excavation choisie pour le projet, et l'intégration de ces objectifs dans le projet stricto sensu ainsi que dans la politique du Schéma Départemental des Carrières,
- une note justificative des choix retenus en termes de valorisation du gisement intégrant les aspects stockage et transport."

C'est aussi à ce stade qu'il est nécessaire de rechercher les zones de mise en dépôt possibles de matériaux excédentaires qui ne pourraient pas faire l'objet d'un réemploi.

8.3.2 Au stade des études de conception

Toutes les reconnaissances géotechniques devant être faites sont réalisées. Ces éléments doivent permettre la définition complète de l'organisation des travaux de déblais, du stockage et du réemploi des matériaux. Pour cela, le GT 35 [32] recommande de :

- "définir et préciser pour chaque partie du massif les utilisations possibles et prévues, selon les critères de classification retenus,
- planifier la gestion des matériaux dans le cadre du projet proprement dit et / ou dans le cadre du contexte régional des ressources en matériaux, en y intégrant les aspects logistique et transport,
- définir les méthodes d'exécution retenues dans la chaîne d'excavation (creusement, marinage, traitement) avec la classe des matériaux obtenus,
- préciser les zones et les conditions de stockage des matériaux en intégrant les contraintes réglementaires".

Concernant ce dernier point, on évitera en particulier de stocker en fond de vallon des matériaux dont le lessivage par les eaux de pluie et de ruissellement pourrait impacter le milieu naturel (c'est par exemple le cas des matériaux contenant du nitrate suite à l'utilisation d'explosif). Dans le même esprit, on évitera le réemploi de tel matériau en base drainante.

8.3.3 Au stade de l'exécution

8.3.3.1 En préalable à l'exécution : la consultation des entreprises

Le dossier de consultation des entreprises va permettre de contractualiser une partie des résultats de l'analyse effectuée précédemment. En cas de variante proposée par l'entreprise, celle-ci devra traiter la valorisation des déblais avec un niveau de détail au moins égal à celui de la solution étudiée lors du projet (PRO).

Pour les déchets de chantier autres que les matériaux d'excavation, le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre peuvent se reposer sur la contractualisation du marché en y intégrant un Schéma d'Organisation et de Suivi de l'Élimination des Déchets⁽¹⁾ (SOSED, *Cf. chapitre 8.4.2*).

La gestion des déchets peut être une condition d'exécution du marché, par exemple en :

- imposant un pourcentage de valorisation des déchets produits par le chantier, par l'intermédiaire du SOSED (ainsi, le maître d'ouvrage peut imposer le broyage des déchets verts *in situ*, pour utilisation en compost),
- définissant les conditions de tri sur le chantier.

Grâce aux dispositions de l'article 53 du Code des Marchés Publics, les critères de sélection des offres peuvent par ailleurs se baser sur des considérations environnementales et donc en particulier la gestion des déchets. Ces "critères ainsi que leur pondération ou leur hiérarchisation sont indiqués dans l'avis public d'appel à la concurrence ou dans les documents de la consultation".

Le critère de protection de l'environnement doit être clairement précisé de manière à ne pas induire de pouvoir discrétionnaire. Il peut s'agir par exemple de tenir compte dans l'analyse des offres :

- du pourcentage de déchets utilisés ou recyclés (minimisation du pourcentage de mise en décharge),
- de la valeur technique du SOSED.

8.3.3.2 Lors du chantier

Lors du chantier, il s'agit de veiller à la mise en œuvre des prescriptions définies lors des études et dans le marché, et le cas échéant de réagir rapidement aux imprévus et aux écarts.

⁽¹⁾ On pourra aussi trouver l'appellation SOGED (Schéma Organisationnel de Gestion et d'Elimination des Déchets)

La recommandation du GT 35 de l'AFTES explique clairement la nature des actions à mener vis-à-vis des matériaux d'excavation en phase travaux. Sont indiqués ici les principaux points recommandés :

- des essais de validation visant à établir la conformité des caractéristiques évaluées en phase d'études avec celles du matériau réellement rencontré;
- des essais de convenance, c'est-à-dire une campagne de vérification et de réglage de la chaîne de production afin de s'assurer qu'elle fournisse des matériaux de caractéristiques conformes à celles requises pour le réemploi;
- une sélection des matériaux à l'avancement et des sondages : ces mesures visent à quantifier de façon continue l'écart entre matériaux rencontrés et matériaux prévus de façon à anticiper et adapter les traitements à la réalité;
- une optimisation du matériel : les matériels employés lors de la phase d'extraction et de marinage ont un effet sensible sur les propriétés des matériaux. Leur emploi doit donc être surveillé et si possible adapté aux variations locales de caractéristiques;
- l'organisation du transport et du stockage des marins :
 - > lors de la manutention souterraine : la chaîne de marinage peut inclure des phases de traitement qui peuvent occasionner des ruptures de charge. Celles-ci devront se traduire par des emplacements disponibles pour un stockage temporaire.

- > lors de la manutention de surface : la surface disponible au niveau des emprises de chantier est un facteur prépondérant. L'organisation de surface doit permettre :
 - une adaptabilité aux variations de cadence d'extraction.
 - le tri de la part valorisable des matériaux,
- la séparation des matériaux de nature différente et leur stockage avant valorisation.

• le traitement des matériaux :

- > un tri des matériaux doit être effectué dès leur extraction, les éléments étrangers (adjuvants, pièces métalliques, etc.) devant être éliminés,
- > les installations doivent être en rapport avec la taille du chantier, contrôlées et adaptées en temps réel en fonction des conditions rencontrées.
- le suivi quantitatif: un travail d'évaluation des quantités de matériaux produites et des demandes en réemploi doit être mené fréquemment afin d'anticiper tout problème d'approvisionnement du chantier procédant à la valorisation:
- la mise en zone de matériaux excédentaires : une fraction des matériaux (la plus faible possible) ne peut faire l'objet d'un réemploi et devra être mise en dépôt. Il importe avant les travaux et pendant ceux-ci de s'assurer que les emprises prévues à cette fin sont de dimensions suffisantes. Avant mise en dépôt, les matériaux devront éventuellement subir des traitements additionnels.

MÉTHODES ET OUTILS DISPONIBLES POUR LA GESTION DES DÉCHETS

8.4.1 Les bordereaux de suivi

Les bordereaux de suivi des déchets assurent la traçabilité des déchets. Ils s'inscrivent dans le principe de la responsabilité du producteur et constituent une preuve de l'élimination du déchet. Ils sont ainsi visés par les différents acteurs des filières d'élimination (producteur, transporteur, collecteur et éliminateur). Ils sont obligatoires pour les déchets dangereux et les déchets contenant de l'amiante mais leur utilisation pour l'ensemble des déchets produits sur un chantier est fortement recommandée.

Des modèles de bordereaux sont téléchargeables sur Internet (formulaire de type Cerfa 12571).

8.4.2 Le Schéma d'Organisation et de Suivi de l'Élimination des Déchets (SOSED)

L'organisation technique sur un chantier de la gestion des déchets se traduit par un SOSED. Ce dernier est le document dans lequel sont précisément décrites les mesures prises pour une bonne gestion des déchets, de la liste des déchets rencontrés jusqu'aux modalités de suivi de leur élimination.

Le SOSED constitue ainsi un document de référence vis-à-vis de la gestion des déchets pour tous les intervenants du chantier.

Dans le cas général, il appartient au maître d'ouvrage de demander aux entreprises de proposer un tel document dans leur offre, à partir d'un cadre préétabli dans le DCE.

Un SOSED doit aborder de manière détaillée les points suivants :

- les méthodes de prévention de la production des déchets,
- les méthodes de non-mélange des déchets sur le chantier et donc le tri effectué en précisant :
 - > les méthodes de séparation des déchets au niveau des postes de travail,
 - > la description des bennes, big-bags, bacs avec rétention et tout autre contenant en fonction des types de déchets,
 - > les zones de stockage envisagées pour les déchets et les moyens d'accès,
 - > l'importance du tri sur le chantier,
 - > la signalétique employée,
- les installations de valorisation, traitement et élimination des déchets en fonction de la nature des déchets :
 - > selon les opportunités locales, les installations seront recherchées en veillant à privilégier les filières de réutilisation et valorisation,
 - > le mode d'évacuation des déchets vers ces installations : transport routier (type de camions), fluvial ou ferré, ainsi que la fréquence d'évacuation doivent être précisés ;
- les moyens de contrôle et de traçabilité des déchets :
 - > il est conseillé de prévoir un bordereau de suivi de déchets (BSD) par type de déchet et par transport ;
 - > les modalités de transmission de l'information aux assistants du maître d'ouvrage doivent être définies;
 - > les moyens humains mis en œuvre pour assurer la réalisation du SOSED doivent être précisés :
 - il est conseillé de désigner un "responsable de la gestion des déchets" au sein de chaque entreprise, présent sur le chantier en permanence ou régulièrement, qui pourra répondre aux questions des ouvriers ou des représentants du maître d'ouvrage.
 - les ouvriers devront être sensibilisés à la gestion des déchets et savoir reconnaître les différents types de déchets.

Le SOSED est finalisé ensuite dans le marché et revu définitivement lors de la préparation du chantier pour coordonner les différents intervenants.

8.4.3 "A chaque déchet sa solution"

Le *tableau 18* présente un panorama rapide des filières envisageables pour les déchets, ainsi que les déblais, en fonction de leur dangerosité. Il est à noter que seuls les déchets ultimes sont admis dans les installations de stockage des déchets (ISD).

Par ailleurs, les déchets classés selon leur nature répondent à des réglementations spécifiques et peuvent être valorisés selon différentes filières.

	Déchets Dangereux	Déchets Non Dangereux	Déchets Inertes	Coût
déchèterie	Х	Х	Х	variable
recyclage		Х	Х	amorti ⁽¹⁾
ISD de classe I	Х			très cher (225 à 1250 €/tonne)
ISD de classe II		Х		cher (50 à 150 €/tonne)
ISD de classe III			Х	faible (5 à 50 €/tonne)

Tableau 18 : panorama rapide des principales filières possibles en fonction de la dangerosité des déchets produits (source : CETE de Lyon)

Afin d'aider les professionnels ainsi que les particuliers dans leur gestion des déchets, l'Ademe (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) propose sur son site Internet des fiches techniques propres à chaque famille de déchets et identifie des solutions pour leur valorisation (http://www.ademe.fr — rubrique "A chaque déchet, des solutions").

La nature des informations disponibles est illustrée dans ce chapitre au travers de deux exemples :

- les câbles qui sont des déchets de métaux non ferreux,
- les équipements électriques et électroniques.

8.4.3.1 Les déchets de métaux non ferreux

Les chutes de câbles, pour lesquels il n'y a pas de réglementation spécifique, entrent dans la catégorie des déchets de métaux non ferreux puisqu'ils sont composés essentiellement de cuivre et sont revêtus d'une gaine en matière plastique. En général, les déchets de câbles sont des déchets non dangereux, sauf s'ils ont été souillés par une matière dangereuse.

Ces déchets ont une valeur marchande non négligeable. Après massification dans une installation de regroupement ou de tri, ils sont renvoyés dans des unités de broyage permettant de séparer les métaux des plastiques. Les métaux peuvent ensuite être acheminés vers des fonderies afin d'être recyclés.

Pour localiser les sites accueillant les déchets de câbles, il est possible de consulter la base de données SINOE (Système d'INformation et d'Observation de l'Environnement), base de données sur les déchets (http://www.sinoe.org/).

⁽¹⁾ Dans le cas de figure où le déchet recyclé est repris comme matériau de base sur le chantier

Il est à noter que le tri permet d'orienter le déchet métallique vers la valorisation optimale, ce qui génère des économies. En effet, il y a possibilité de reprise par un récupérateur à un prix qui dépend de la valeur marchande des métaux. Le coût interne du tri peut être minimisé s'il est effectué au plus près de la source du déchet.

8.4.3.2 Les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE)

Les tunnels sont équipés de matériels électriques destinés à assurer le confort et la sécurité des usagers. A ce titre, certains déchets liés à des opérations de rénovation, d'entretien ou de maintenance peuvent entrer dans la catégorie des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE). Il s'agit des équipements ayant une tension d'utilisation inférieure à 1000 volts (AC) figurant dans l'une des dix catégories de produits placées à l'annexe de l'article R.543-172 du Code de l'Environnement et précisées dans un avis aux producteurs d'équipements électriques et électroniques du ministère de l'écologie (JORF du 26/10/05).

Concernés par l'article	Non concernés par l'article
R.543-172 CE	R.543-172 CE
Matériel électronique de	Matériel de distribution et
sécurité, systèmes d'alarme	de commande (tableaux
incendie, détecteurs de fumée,	électriques, prises de courant,
matériel de vidéo-surveillance,	interrupteurs), câbles et
matériel d'éclairage et luminaires	protections de câble

Tableau 19 : Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (source : CETE de Lyon)

Les DEEE sont en grande majorité des déchets non dangereux mais peuvent être constitués ou contenir des composants tels qu'amiante ou PCB impliquant un classement comme déchets dangereux.

Les DEEE professionnels issus de produits mis sur le marché après le 13 août 2005 sont soumis à des dispositions spécifiques fixées par les *articles R.543-172 et suivants du Code de l'Environnement.* Ces articles imposent que des filières sélectives de gestion soient mises en œuvre sous la responsabilité des producteurs.

Ces producteurs ont l'obligation d'organiser et de financer l'enlèvement et le traitement, sauf s'ils en ont convenu autrement avec les utilisateurs dans le contrat de vente de l'équipement. Dans ce dernier cas, le contrat de vente de l'équipement doit prévoir les conditions dans lesquelles l'utilisateur assure pour tout ou partie l'élimination du déchet issu de cet équipement.

Le détenteur pourra s'adresser aux producteurs ou à leurs organisations professionnelles respectives pour connaître le réseau de points d'enlèvement à sa disposition et les modalités pratiques d'accès.

Pour les DEEE professionnels issus de produits mis sur le marché **avant le 13 août 2005**, l'enlèvement et le traitement incombent aux utilisateurs sauf s'ils en ont convenu autrement avec les producteurs. Le détenteur doit donc faire appel à un prestataire de service de collecte et de traitement de ces déchets.

Ces dispositions impliquent le tri sélectif des DEEE sur ou en aval du chantier de rénovation ou d'entretien, et leur orientation dans des filières d'élimination adaptées capables de satisfaire notamment :

- aux prescriptions de traitement particulières (dépollution préalable de certains équipements : accumulateurs nickelcadmium, mercure des lampes, etc.),
- aux taux de valorisation ambitieux fixés par la réglementation (jusqu'à 80 % du poids moyen par appareil, dont 50 % de recyclage matière et / ou réutilisation).

Dans le cadre des chantiers, le maître d'ouvrage devra intégrer les coûts de gestion associés en donnant les moyens à la maîtrise d'œuvre et aux entreprises d'organiser leur élimination. Il peut s'inspirer d'un guide élaboré par TERRA (Comment évaluer la qualité des prestations de regroupement et de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques - Guide TERRA - ELEN, le MINEFI et SCRELEC [33]).

Actuellement, la filière de recyclage des métaux draine une grande part du gisement total des déchets d'équipements électriques en fin de vie. Certains DEEE intéressent des opérateurs pour une revente sur un second marché. Ces DEEE sont principalement des équipements relevant de technologies électroniques tels les équipements de télécommunications, les automates, etc. Mais il peut s'agir également de grosses installations comme des cellules ou des transformateurs.

Enfin, pour localiser les sites accueillant les DEEE, il est possible de consulter la base de données SINOE de l'ADEME (http://www.sinoe.org/)

8.4.4 Les outils de planification de la gestion des déchets

À l'échelle locale, trois outils de planification de la gestion des déchets sont disponibles :

- le plan départemental de gestion des déchets du BTP,
- le plan départemental d'élimination des déchets ménagers et assimilés,
- le plan régional d'élimination des déchets industriels spéciaux.

EXEMPLES DE MISE EN ŒUVRE D'OPÉRATIONS DE TRAITEMENT DES DÉCHETS

8.5.1 Exemples de dispositifs à mettre en œuvre sur un chantier

Les chantiers de construction de tunnel sont susceptibles de produire de très importantes quantités de déchets qui se déclinent en :

- matériaux (terres et déblais) relativement homogènes,
- déchets plus hétérogènes des entreprises.

Le tri de ces déchets en vue d'une valorisation ou d'un traitement spécifique est difficile à réaliser *a posteriori* et il est préférable d'organiser sur le chantier (en fonction de l'espace disponible) une collecte séparative des déchets qui évite en amont le mélange des déchets.

Le tableau 20 donne les bases de la forme que peut prendre le tri et le stockage de ces différents déchets selon leur nature. Les phases d'enlèvement de ces produits par une entreprise agréée doivent faire l'objet de l'émission et l'archivage d'un bordereau de suivi. Celui-ci est obligatoire pour les déchets de classe I et recommandé dans les autres cas. Il précisera notamment la nature et la masse des déchets enlevés.

Enfin, certains déchets stockés provisoirement sur le chantier ont un caractère dangereux et peuvent être à l'origine d'une pollution accidentelle. Ces déchets impliquent la mise en place de moyens de prévention en cas d'incident (*Cf. tableau 21*).

Nature des déchets	Mode de stockage sur chantier	Évacuation / traitement
Huiles de vidange	Fûts spécifiques sur bacs de rétention, à l'abri des intempéries	Enlèvement et traitement par une société spécialisée dans la récupération des déchets.
Filtres et chiffons gras	Fût pour déchets solides de classe 1 à l'abri des intempéries	Enlèvement et traitement par une société spécialisée dans la récupération des déchets
Piles / cartouches d'encre	Carton pour piles et carton pour les cartouches d'encre	Évacuation vers lieux de récupération spécifiques
Ordures ménagères	Conteneurs à ordures plastiques fermés par nature de déchets (plastiques, papier, verre, reste des ordures ménagères)	Ramassage par les services de la Commune, la communauté de communes ou le syndicat en charge de la collecte des ordures ménagères
Déchets de chantier type bois, métaux, plastique, polyane, etc.	Bennes à déchets de classe 2. Pas de brûlage	Enlèvement et traitement par une société spécialisée dans la récupération des déchets (puis recyclage ou stockage en installation de stockage de déchets non dangereux ou incinération)
Matériaux issus du creusement	Stocks provisoires aux têtes de tunnel	Tri entre déchets inertes / non inertes Réutilisation chantier ou évacuation en installation de stockage de déchets inertes ou évacuation en installation de traitement
Matériaux inertes autres que ceux issus du creusement (béton sans ferraille, gravas, etc.)	Stockage dans une benne spécifique	Réutilisation chantier ou évacuation en installation de stockage de déchets inertes

Tableau 20 : organisation de la gestion des déchets sur un chantier (source : CETU, inspiré du Plan de Respect de l'Environnement du tunnel du Bois de Peu)

Accident	Actions	Moyens	
	Étancher (en prenant des précautions vis-à-vis de la nature du produit)	Matériel atelier, kit anti-pollution. Les kits anti-pollutions sont présents dans les installations principales et secondaires.	
	Confiner le maximum de liquide	Terre, sciure, boudin du kit anti-pollution	
Fuite	Récupérer le maximum des produits	Sciure, poudre absorbante, récupération des terres polluées	
	Obturer les points de communication avec la nappe, les cours d'eau, le circuit des eaux pluviales	Obturer les points d'évacuation avec le boudin du kit anti-pollution	
	Reconnaître le cheminement du produit depuis le point de déversement		

Tableau 21 : moyens d'intervention en cas d'urgence (source : CETU, inspiré du Plan de Respect de l'Environnement du tunnel du Bois de Peu)

8.5.2 Travaux de sécurisation du tunnel Maurice Lemaire à Sainte-Marie-aux-Mines dans le Haut-Rhin

Les éléments qui suivent sont en partie extraits d'un article paru dans la revue Travaux n°855 – Septembre 2008 [34] (pp39-46, Thiboud A., Tournery H. et Duteil A).

Dans le cadre des travaux de sécurisation du tunnel Maurice Lemaire, a été mis en œuvre le recyclage de 1374 caissons de ventilation d'un poids unitaire de 20 tonnes soit près de 30 000 tonnes de béton armé préfabriqué.

Les caissons de ventilation (*Cf. photo 14*) qui dataient des années 70 permettaient l'injection d'air frais tout au long de l'ouvrage ainsi que le désenfumage en cas d'incendie. Les performances du système de ventilation étaient devenues insuffisantes au regard de l'évolution de la réglementation.



Photo 14: caisson de ventilation (source: Thiboud A, Tournery H. et Duteil A, Travaux n°855 – Septembre 2008, [34])

Lors des études d'impact, le maître d'ouvrage, Autoroutes Paris Rhin Rhône, a décidé, en plus de la réutilisation des matériaux d'excavation de la galerie latérale (200 000 m³), d'imposer dans le cahier des charges de la consultation des travaux de génie civil, l'obligation de recycler les 30 000 tonnes de béton armé constituées par les caissons.

Les travaux de démontage ont nécessité la mise en place d'une cellule de préparation sur le chantier pour :

- trouver un terrain afin de stocker, nettoyer, démanteler les caissons et stocker les matériaux avant réemploi,
- viabiliser et sécuriser le terrain,
- mettre en place une unité de nettoyage et de traitement,
- définir, construire et tester un outil pour la dépose des éléments,
- mettre au point des unités de transport et obtenir les autorisations nécessaires pour les convois.

Un outil spécifique constitué d'un portique automoteur avec deux plateaux latéraux a permis le démontage et le transfert des caissons vers une aire de stockage. Cette dernière était étanche afin de récupérer les eaux de pluie éventuellement polluées par les caissons.

Un hangar a été construit (*Cf. photo 15*) pour abriter une unité de traitement des éléments métalliques, une chaîne de lavage haute pression des caissons et une unité de traitement-dépollution des eaux de lavage.



Photo 15 : aire de traitement (source : Thiboud A, Tournery H. et Duteil A, Travaux n°855 – Septembre 2008, [34])

En effet, les caissons évacués présentaient des dépôts de poussières dus au trafic de véhicules pendant la période d'exploitation. Ils devaient donc être nettoyés avant leur recyclage selon deux phases :

- une première phase de nettoyage intérieur des caissons menée manuellement et à l'aide de nettoyeurs haute pression; les joints d'étanchéité et pièces métalliques ont été retirés et traités séparément;
- une deuxième phase de lavage automatisée.

A l'issue, le suivi de la qualité des caissons, en tant que déchet inerte, a été réalisé à travers un test spécifique.

Les éléments nettoyés ont été retirés de la zone de stockage, mis en disposition sur une aire spécifique et morcelés en éléments de moins de 80 cm à l'aide de pelles équipées d'un brise-roche hydraulique (*Cf. photo 16*). Les matériaux résultants

ont ensuite été concassés à l'aide d'un concasseur équipé d'un tapis à électroaimant permettant la séparation des éléments métalliques et du béton, puis repris par chargeur pour être déposés, provisoirement, en cordon sur une hauteur de 6 m afin d'assurer une protection phonique des riverains pendant le chantier. Le reste des matériaux a été stocké sur site en attente d'un réemploi ultérieur. Tous les matériaux (métal, béton, etc.) ont fait l'objet d'une traçabilité jusqu'à leur valorisation. Les produits qui ne pouvaient être valorisés ont été dirigés vers des centres de traitement spécialisés.



Photo 16: opération de concassage des éléments de caisson (source: Thiboud A., Tournery H. et Duteil A., Travaux n°855 – Septembre 2008, [34])

Les diverses manutentions ont été réalisées par des stackers spécialement adaptés. La logistique et l'organisation de la plateforme ont été assurées par l'entreprise.

DISPOSITIONS RÉGLEMENTAIRES

8.6.1 Principes généraux

Tous les textes réglementaires concernant la gestion des déchets sont retranscrits dans le Code de l'Environnement, en son livre V (prévention des pollutions, des risques et des nuisances), titre IV.

Ces dispositions ont pour but (article L541-1):

- "en priorité, de prévenir et de réduire la production et la nocivité des déchets, notamment en agissant sur la conception, la fabrication et la distribution des substances et produits et en favorisant le réemploi, ainsi que de diminuer les incidences globales de l'utilisation des ressources et d'améliorer l'efficacité de leur utilisation;
- de mettre en œuvre une hiérarchie des modes de traitement des déchets consistant à privilégier, dans l'ordre : la préparation en vue de la réutilisation, le recyclage, toute

autre valorisation, notamment la valorisation énergétique, l'élimination :

- d'assurer que la gestion des déchets se fait sans mettre en danger la santé humaine et sans nuire à l'environnement, notamment sans créer de risque pour l'eau, l'air, le sol, la faune ou la flore, sans provoquer de nuisances sonores ou olfactives et sans porter atteinte aux paysages et aux sites présentant un intérêt particulier;
- d'organiser le transport des déchets et de le limiter en distance et en volume ;
- d'assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique des opérations de production et de gestion des déchets, sous réserve des règles de confidentialité prévues par la loi, ainsi que sur les mesures destinées à en prévenir ou à en compenser les effets préjudiciables."

Le cadre réglementaire de la gestion des déchets repose par ailleurs sur le principe du pollueur-payeur (article L110-1 alinéa 3 du Code de l'Environnement) "selon lequel les frais résultant des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur". Dans cette logique, le stockage des déchets est soumis à la taxe générale sur les activités polluantes, qui sera acquittée par le maître d'ouvrage.

8.6.2 Des textes spécifiques selon la nature des déchets

Comme déjà indiqué dans ce document, les déchets classés selon leur nature répondent à des réglementations spécifiques.

Pour connaître ces réglementations spécifiques, il convient de s'aider des outils mis à disposition des professionnels, à l'image des fiches techniques propres à chaque famille de déchet proposées par l'Ademe sur son site Internet (http://www.ademe.fr - rubrique "A chaque déchet, des solutions")

Pour la réglementation spécifique relative aux matériaux d'excavation, la recommandation du GT35 fournit l'ensemble des références utiles. Un exemple de réglementation est donnée dans le *tableau 22*.

Code (décret n° 2002-540)	Description	Restrictions
17 01 01	Bétons	Uniquement déchets de construction et de démolition triés (1)
17 01 07	Mélange de béton, briques, tuiles et céramiques	Uniquement déchets de construction et de démolition triés (1)
17 03 02	Mélanges bitumineux	Uniquement après réalisation d'un test permettant de s'assurer de l'absence de goudron
17 05 04	Terres et pierres (y compris déblais)	A l'exclusion de la terre végétale et de la tourbe ; pour les terres et pierres provenant de sites contaminés, uniquement après réalisation d'une procédure d'acceptation préalable
17 06 05	Matériaux de construction contenant de l'amiante	Uniquement les déchets d'amiante lié aux matériaux inertes (amiante-ciment, etc.) ayant conservé leur intégrité

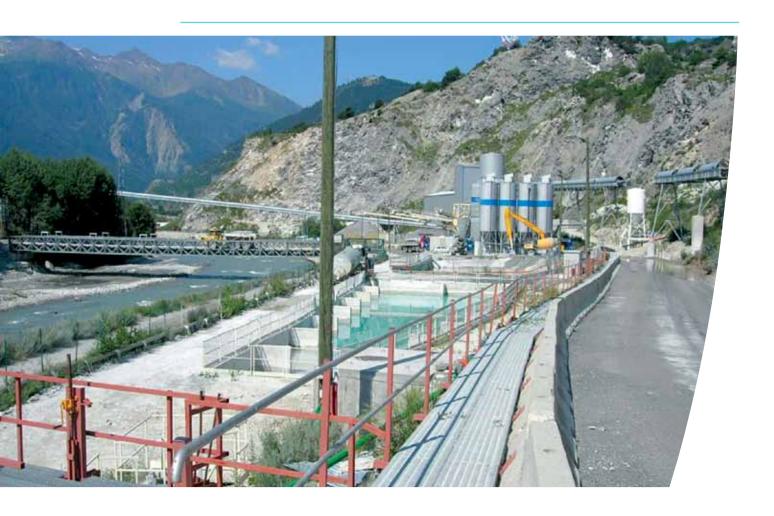
Tableau 22 : extrait de la liste des déchets de construction et de démolition admissibles sans essai dans les installations de stockage de déchets inertes (annexe 1 de l'arrêté du 15 mars 2006 du ministre de l'écologie et du développement durable, fixant la liste des types de déchets inertes admissibles dans des installations de stockage de déchets inertes et les conditions d'exploitation de ces installations)

(1) Les déchets de construction et de démolition triés mentionnés dans cette liste et contenant en faible quantité d'autres types de matériaux tels que des métaux, des matières plastiques, du plâtre, des substances organiques, du bois, du caoutchouc, etc. peuvent également être admis dans l'installation.

QUELQUES RÉFÉRENCES UTILES

- [32] Recommandation sur la gestion et la valorisation des matériaux d'excavation / revue Tunnels et Ouvrages Souterrains n°199 / GT n°35 de l'AFTES / février 2007.
- [33] Comment évaluer la qualité des prestations de regroupement et de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques / Guide TERRA pour le compte d'ELEN, du MINEFI, de la FIEEC et de SCRELEC / octobre 2003.
- [34] Travaux de sécurisation du tunnel Maurice Lemaire à Sainte-Marie-aux-Mines (68) / revue Travaux n°855 (pp39-46) / Thiboud A., Tournery H. et Duteil A / septembre 2008.
- [35] Gestion et valorisation des matériaux d'excavation de tunnels, analyse comparative de trois grands projets / J. Burdin, C. Thalmann, C. Carron, L. Brino / octobre 2005.

9. EAU ET ASSAINISSEMENT



La création d'ouvrages souterrains comme les tunnels et les tranchées couvertes peut être à l'origine de perturbations modifiant les conditions naturelles du cycle de l'eau, notamment la partie souterraine du cycle. Les modifications des conditions hydrologiques d'un secteur peuvent avoir des effets sur les nappes et les sources, les écosystèmes associés comme les zones humides, le régime des cours d'eau, l'agriculture, mais également sur la pérennité de l'ouvrage. Les impacts de l'ouvrage sur les écoulements de l'eau sont directement liés à sa position par rapport à la nappe et / ou aux écoulements et, de façon plus générale, à la nature du contexte hydrogéologique.

Les perturbations du cycle de l'eau peuvent intervenir durant la construction des ouvrages, leur exploitation et leur entretien. Toutes ces perturbations potentielles sont de nature :

- quantitative par la modification des écoulements de l'eau souterraine et / ou superficielle,
- qualitative par l'altération des propriétés physico-chimiques naturelles des eaux notamment lors du rejet dans le milieu naturel d'eau d'assainissement ou par l'altération bactériologique des eaux en lien avec les matières en suspension.

La prévision des impacts et l'estimation des mesures à mettre en œuvre afin d'y remédier demandent une compréhension complète des écoulements souterrains et superficiels dans le périmètre d'influence du projet.

SPÉCIFICITÉS DES TUNNELS VIS-À-VIS DU CYCLE DE L'EAU

9.1.1 Une zone d'influence difficile à délimiter

Contrairement aux infrastructures de transport en surface dont l'impact sur le cycle de l'eau peut être aisément prédit au moyen d'études appropriées, les ouvrages souterrains peuvent avoir des conséquences dont la prédiction est plus difficile, en particulier en milieu fissuré et / ou discontinu. Ainsi, en milieu karstique, l'influence d'un tunnel peut se répercuter sur des sources à plusieurs kilomètres de distance.

Les études doivent permettre de connaître le contexte hydrogéologique dans lequel sera implanté l'ouvrage, les relations hydrauliques entre les eaux souterraines et superficielles, le fonctionnement global du système aquifère ainsi que toutes les caractéristiques du ou des bassins versants hydrodrologiques et hydrogéologiques.

9.1.2 Des écoulements de l'eau souterraine et superficielle perturbés

En terrain aquifère, l'ouvrage souterrain provoque un drainage provisoire limité à la phase chantier, ou parfois à caractère permanent, ce qui peut entraîner un rabattement de la nappe pouvant se répercuter sur de longues distances notamment pour les aquifères à porosité d'interstices.

Selon son orientation par rapport aux écoulements souterrains, l'ouvrage peut également faire effet de barrage en entraînant un abaissement de la nappe en aval et / ou une augmentation du niveau piézométrique en amont. Ce risque de barrage est surtout lié à la réalisation des tranchées couvertes.

Il est donc indispensable d'étudier en détail, dans le périmètre d'influence du projet, les zones où les nappes participent de façon directe ou indirecte à la constitution des ressources en eau.

En milieux fissurés et karstiques, les impacts sont ponctuels, localisés au niveau des exutoires et difficiles à prévoir.

Ainsi, en Savoie, en terrains calcaires, des études ont montré que le tarissement de sources dans la Montagne du Chat était directement lié à la création d'ouvrages souterrains dans la zone. Également, durant la même période des travaux, des désordres avaient été constatés comme la turbidité excessive des eaux et la baisse de niveau d'étiage, sans que cela ait pu être attribué à la création des ouvrages (*Université de Savoie, 1992, étude spécifique hydrogéologique dans le secteur d'Aiguebelette*).

9.1.3 Des eaux de chantier chargées en matière en suspension

Lors de la phase chantier, le volume des eaux à traiter peut être très important. Ces eaux sont très chargées en matière en suspension, bien plus que dans le cadre d'un chantier à l'air libre. Elles peuvent présenter des températures, un pH et parfois des concentrations en nitrates (du fait de l'utilisation d'explosifs) qui ne sont pas compatibles avec le milieu naturel. Il en résulte des installations de traitement des eaux de chantier très lourdes.

9.1.4 Des rejets concentrés en polluants lors des phases de lavage

En phase exploitation, la pollution des eaux liée aux ouvrages souterrains est de même nature que celle des infrastructures de transport à l'air libre et renvoie aux techniques d'assainissement routier.



Photo 17 : opération de lavage dans le tunnel de Fourvière à Lyon (source : CETU)

La particularité des ouvrages souterrains réside dans l'absence de lessivage des voies par les eaux de précipitation atmosphérique. Les charges polluantes dues à la circulation des véhicules sont du même ordre de grandeur qu'à l'air libre pour des conditions de trafic semblables. Toutefois, le rejet de la pollution en tunnel est concentré, pour l'essentiel, au moment des lavages conduisant à des concentrations en substances relativement élevées.

ENJEUX ET IMPACTS LIÉS À L'EAU

La protection de la ressource en eau et des écosystèmes aquatiques constitue aujourd'hui l'un des enjeux majeurs de la politique environnementale française, au travers de la loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques de 2006 (LEMA), et européenne, au travers de la Directive Cadre sur l'Eau de 2000 (DCE). Ces politiques visent notamment à atteindre les exigences de qualité chimique et écologique des milieux et le maintien des usages de la ressource en eau.

Dans le cadre d'un projet d'ouvrage souterrain, une prise en compte satisfaisante des enjeux liés à l'eau nécessite une réflexion spécifique à chaque phase d'avancement du projet, et une connaissance croissante de la zone d'étude.

Le but est de répondre au mieux aux principes généraux de préservation, de non-dégradation et de protection de la ressource en eau et des milieux aquatiques. Par conséquent, il est indispensable de savoir en quoi un projet d'ouvrage souterrain tant en phase chantier qu'exploitation est susceptible d'avoir un impact sur les ressources en eau ainsi que sur tous les milieux aquatiques. Il est également indispensable d'identifier dans la zone d'étude élargie les usages de l'eau (alimentation en eau potable, pêche, agroalimentaire, irrigation, industrie, etc.).

9.2.1 En phase chantier

Durant la phase chantier, dans les milieux alluviaux, une influence à court terme sur le régime de la nappe d'eau souterraine peut être occasionnée par des pompages ou des prises d'eau souterraine entraînant l'assèchement temporaire de sources, de puits et de zones humides. Les conséquences

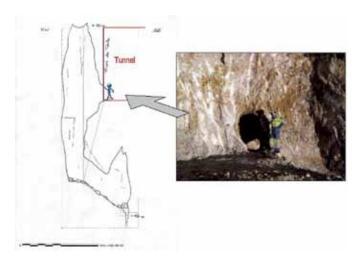


Photo 18 : ouverture d'un karst au front lors du creusement du tunnel du Bois de Peu (source : CETU)

sur les milieux aquatiques pouvant être irréversibles, les procédés de construction seront à adapter aux prescriptions pour la protection des eaux souterraines et superficielles.

Dans les milieux fissurés et karstiques (*Cf. photo 18*), la rencontre de venues d'eau durant le creusement de l'ouvrage entraîne la modification de l'écoulement souterrain par la création d'un nouvel exutoire artificiel. Ce phénomène peut être irréversible et provoquer l'assèchement de sources et la chute des niveaux d'étiage réduisant ainsi les débits des cours d'eau.

Au-delà des aspects quantitatifs évoqués précédemment, le déroulement du chantier nécessite également une vigilance vis-à-vis des milieux aquatiques et de la qualité des eaux. La dégradation de la qualité des eaux et des milieux aquatiques peut provenir :

- des installations de chantier avec :
 - > les aires d'installation de chantier et le stockage de produits,
 - > les ateliers de mécanique,
 - > les aires de stationnement des engins et véhicules divers
 - > les zones de nettoyage des engins et de ravitaillement en carburant,
 - > les aires de stockage des matériaux,
 - > les pistes de chantier,
 - > les locaux sanitaires ;
- des rejets provisoires comme :
 - > les rejets contaminés par le décapage des emprises (notamment MES),
 - > les rejets d'exhaures (eau de drainage de massif),
 - > les rejets sanitaires,
 - > les rejets d'eaux de lavage (matériaux, engins, aires de traitement) ;
- des zones de stockage de matériaux (en raison du stockage de déblais riches en nitrate du fait de l'utilisation d'explosifs par exemple).

La mise en place d'une bonne organisation de chantier, avec le suivi rigoureux d'un Plan Assurance Environnement, permet de maîtriser une grande partie de ces impacts potentiels en phase chantier.

Le volume des matériaux excavés pour un chantier d'ouvrage souterrain impose une vigilance particulière. Le plan de gestion de ces matériaux et leur zone de dépôt temporaire doivent être définis en tenant compte de la nature des déblais, de l'éventuelle solubilité de certaines roches et d'éventuelles zones où les sols ont été contaminés dans le passé par des activités anthropiques. Les zones de dépôt devront éviter les zones réglementées visà-vis de l'eau comme les zones humides, les périmètres de protection des captages d'eau, les zones NATURA 2000 (liées à l'eau), les lits majeurs de cours d'eau, etc.

Plus globalement, la gestion de la pollution des eaux demande des moyens adaptés avec notamment la mise en œuvre de dispositifs temporaires de traitement des eaux de drainage de massif ainsi que des eaux de plate-forme où circulent les engins de chantier. Ces dispositifs temporaires devront être correctement dimensionnés et ainsi résister à des évènements climatiques particuliers.

9.2.2 En phase d'exploitation

L'inscription d'un tunnel dans les nappes peut apporter des modifications permanentes des écoulements souterrains particulièrement si des pompages réguliers doivent être maintenus pour abaisser le niveau de la nappe.

Ces modifications peuvent se répercuter sur le régime des nappes, des sources et des cours d'eau. Toutefois, les études hydrogéologiques réalisées en amont de la démarche d'étude permettent de mettre en place un ouvrage minimisant les perturbations hydrauliques au sein du massif et de s'assurer que les ressources de l'aquifère seront conservées. Les études pourront aller jusqu'à la réalisation d'un modèle déterministe numérique qui permettra de quantifier avec détail l'impact de l'ouvrage sur les écoulements souterrains et de tester l'efficacité des solutions techniques proposées pour remédier aux impacts (*Cf. chapitre 9.4*).

En milieu fissuré, les venues d'eau pérennes rencontrées en phase travaux peuvent avoir un impact par les modifications des circulations et par leurs rejets hors du tunnel dans le milieu naturel (température et minéralisation). Seul l'impact qualitatif peut être traité par des dispositions techniques d'assainissement des eaux (*Cf. chapitre 9.5*).



Photo 19 : venue d'eau dans un tunnel en période hivernale (source : CETU)

Par ailleurs, le lavage périodique des parois des ouvrages souterrains engendre une pollution des eaux collectées par des substances organiques (essences, carburants, etc.), par des métaux lourds et par les adjuvants de l'eau de lavage (détergents). Un système de collecte, d'évacuation et de traitement des eaux de lavage devra être dimensionné afin de respecter les principes généraux de protection de la ressource en eau et des milieux aquatiques (*Cf. chapitre 9.5*).

Le réseau d'assainissement de chaussée devra pour sa part être dimensionné pour collecter et maintenir une pollution accidentelle par déversement sur la chaussée. Une attention particulière sera portée au dimensionnement du réseau d'assainissement temporaire pour supporter des évènements hydrologiques particuliers comme les crues.

9.3 DÉMARCHE D'ÉTUDE

Aux différents stades d'un projet d'ouvrage souterrain, le contenu des études doit permettre de prendre correctement en compte les enjeux liés à l'eau avec :

- le respect du bon état chimique, biologique, bactériologique et écologique des masses d'eau,
- l'évaluation des principaux impacts du projet sur la dégradation de la qualité chimique, biologique et bactériologique des eaux par les rejets et sur la dégradation du milieu physique par la modification des écoulements.

Toutes les données et informations sur l'eau récoltées aux divers stades du projet seront intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG).

9.3.1 Au stade des études amont

9.3.1.1 L'étude d'opportunité

A ce stade, l'objectif est de préciser les enjeux environnementaux liés au domaine de l'eau dans la zone d'étude élargie du projet d'ouvrage souterrain (*Cf. tableau 23*).

Il s'agit de collecter les données et informations existantes afin de délimiter le périmètre d'influence de l'ouvrage souterrain et de ses installations liées. Le périmètre d'influence désigne le périmètre dans lequel peuvent apparaître des impacts sur l'eau et les milieux aquatiques (eau superficielle et souterraine). Ces impacts peuvent apparaître de façon indirecte. Si les données et informations disponibles ne sont pas jugées suffisantes à ce stade du projet, des reconnaissances pourront être programmées.

Objectifs	Éléments	Organismes ou données ressources
(1) connaître le contexte hydrologique et	cartes et coupes géologiques et hydrogéologiques	cartes du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et base de données (InfoTerreTM)
hydrogéologique de la zone d'étude élargie	délimitation des grands aquifères et localisation des nappes (carte des masses d'eau et piézométrie)	base de données et documentaires des Agences de l'Eau (BD SANDRE) et des DREAL
	localisation des périmètres de protection des captages d'eau pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) et leur DUP	données et base de données des DDT (Direction Départementale des Territoires) et autres services impliqués dans la police de l'eau
(2) localiser et identifier les usages des eaux	catégorie des cours d'eau et de leur qualité	base de données de l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) et des DREAL
	localisation des zones humides et des zones naturelles réglementées liées à la présence d'eau (ZNIEFF, NATURA 2000, etc.)	base de données des DREAL
(3) identifier les	prescriptions générales du SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux)	Agences de l'Eau
principaux enjeux et les contraintes liés au domaine de l'eau	prescriptions locales si existence de SAGE (Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux), de programmes d'action de contrats de rivière ou de nappe	documents des Agences de l'Eau, des Conseils Généraux et des DREAL

Tableau 23 : données utiles relatives au domaine de l'eau en vue de la réalisation d'une étude d'opportunité (source : CETE de Lyon)

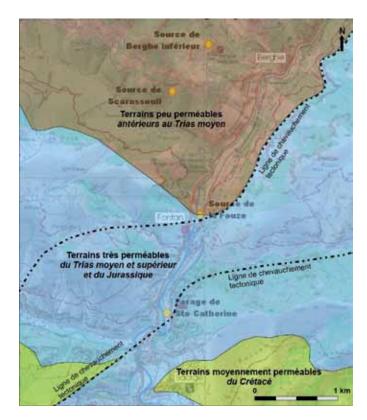


Illustration 18 : données hydrogéologiques en vue de la déviation en tunnel du village de Fontan dans les Alpes-Maritimes (source : CETU)



Illustration 19 : réseau hydrographique et repérage des sources en vue de la déviation en tunnel du village de Fontan dans les Alpes-Maritimes (source : CETU)

9.3.1.2 Les études préalables à l'enquête publique

Les trois objectifs visés lors de l'étude d'opportunité restent d'actualité et leur maîtrise peut être affinée.

Ainsi, afin d'affiner la connaissance du contexte hydrologique et hydrogéologique de la zone d'étude élargie (1), il faut :

- élargir le recueil de données à toutes les données permettant de connaître la nature et les propriétés du sous-sol (documents tirés d'études universitaires, de bureaux d'études publics et privés, etc.) et effectuer les investigations complémentaires nécessaires dans le cadre du projet,
- caractériser tridimensionnellement la structure géologique et hydrogéologique de la zone d'étude à l'aide des résultats des reconnaissances et investigations de terrain liées au projet (géologie, géotechnique, hydrologie et hydrogéologie),
- quantifier les bilans hydrologiques au moyen des relations nappe-rivière, de la connaissance des régimes hydrauliques et des propriétés hydrodynamiques des milieux ainsi que de la détermination des caractéristiques morpho-dynamiques de l'ensemble des bassins versants.

La localisation et l'identification des usages de l'eau (2) seront complétées par :

- la localisation des ressources alternatives en eau (réserve identifiée ou zone potentiellement exploitable) à l'aide des documents produits par les Agences de l'Eau, les DREAL, les Conseils Généraux, etc.
- la localisation de zones d'aquaculture, de baignades, de zones de loisirs, d'irrigation, etc. à l'aide des documents produits par les institutions de l'Eau (DREAL, DDT, Agences de l'Eau, collectivités, associations, etc.).

L'identification des enjeux et contraintes de l'eau (3) sera pour sa part complétée par la caractérisation des masses d'eau dans la zone élargie du projet et notamment la recherche de toutes les données relatives à la qualité chimique et écologique de ces eaux.

Reste à répondre aux deux objectifs spécifiques de cette phase d'étude que sont la quantification des impacts et la proposition de mesures vis-à-vis de ces impacts. Le contenu attendu des études pour répondre à ces deux objectifs est précisé dans le *tableau 24*.

Objectifs	Éléments attendus	Données nécessaires
	évaluation quantitative des risques sanitaires	recherche de stations de mesures dans la zone d'étude élargie (BD SANDRE)
(4) quantifier les impacts		mesures de terrain dans le cadre du projet et modélisation
des variantes du projet sur les eaux et les		fonctionnement hydrologique (eau superficielle et souterraine) de la zone d'étude potentiellement impactée
milieux aquatiques	évaluation des impacts du projet sur les eaux et les milieux aquatiques	fonctionnement hydrodynamique des eaux et des milieux aquatiques
		modélisation hydrologique (eau superficielle et souterraine)
	principes directeurs de l'assainissement en phase exploitation	choix d'une stratégie adaptée au contexte : • définition des objectifs, • localisation des ouvrages de traitement et des éventuels rejets
(5) proposer des mesures pour la réduction des	mesures temporaires de phase chantier pour la gestion des eaux naturelles et effluents	choix d'une stratégie adaptée au contexte : • définition des objectifs, • localisation des ouvrages de traitement et des éventuels rejets
impacts	solutions pour le maintien de l'alimentation des ressources en eau et des milieux naturels remarquables liés à l'eau solutions pour le maintien des fonctionnalités des zones humides	inventaire des zones humides et autres milieux remarquables potentiellement impactés par le projet

Tableau 24 : phase de comparaison des variantes et de détermination des mesures de réduction des impacts (source : CETE de Lyon)

Ce stade de la démarche se caractérise par la mise en œuvre de nombreuses études et investigations de terrain dont une liste non exhaustive est donnée au *chapitre 9.4*. La réalisation de toutes ces études doit permettre d'aboutir à une bonne compréhension de la dynamique du cycle de l'eau et des milieux aquatiques associés dans la zone d'étude afin de quantifier l'impact de l'ouvrage souterrain.

9.3.2 Au stade des études de conception

Il s'agit de préciser l'ensemble des mesures (*Cf. chapitre 9.5*), c'est-à-dire les dimensionner plus finement puisque le projet est maintenant positionné précisément. Les éventuelles modifications issues de l'enquête publique et de la concertation sont intégrées. Lorsqu'il s'est écoulé un long délai depuis le stade de l'enquête

publique, il convient d'ailleurs d'actualiser les données récoltées au cours des stades précédents du projet.

Les objectifs de cette phase sont aussi de réaliser les études détaillées spécifiques et notamment le dossier d'incidence "loi sur l'eau" (*Cf. chapitre 1.1.2.2*) et les autres procédures réglementaires préalables aux travaux (dont le régime d'autorisation - déclaration "loi sur l'eau").

9.3.3 Au stade de l'exécution

En phase travaux, au même titre que pour toutes les thématiques environnementales, on veillera à la mise en œuvre des moyens de réduction des impacts prévisibles du chantier et à leur efficacité. Cette dernière pourra être suivie au travers de la surveillance des débits et de la qualité des eaux potentiellement impactées par le chantier.

Mesures	Objet des études
vis-à-vis du maintien des	estimation du coût des mesures environnementales correspondantes
usages et des milieux	• mise en place de campagnes de suivi de l'évolution des milieux et de l'efficacité des mesures
vis-à-vis de l'assainissement routier	 implantation définitive et dimensionnement des ouvrages de collecte, de régulation et de traitement des eaux répondant à des objectifs précis d'efficacité, plans et coupes des ouvrages et descriptifs des équipements de manœuvre modalités de gestion des ouvrages hydrauliques et d'assainissement et gestion des sous- produits programme de suivi de la pérennité et de l'efficacité des mesures
vis-à-vis de la phase chantier pour la gestion des eaux naturelles et des effluents	• mise en œuvre de mesures de prévention et gestion de crise en phase chantier et cahier des charges correspondant pour la maîtrise des risques de pollutions (MES, substances chimiques ou organiques) et d'érosion des sols ainsi que la sauvegarde des habitats et espèces aquatiques sensibles et la remise en état des lieux

Tableau 25 : intégration des mesures au stade des études de conception (source : CETE de Lyon)

MÉTHODES ET MOYENS D'ÉVALUATION

La connaissance du contexte et du fonctionnement hydrogéologique dans le périmètre d'influence du projet implique souvent la mise en œuvre de méthodes et moyens spécifiques. Il s'agit notamment de connaître les conditions aux limites du périmètre d'étude avec les zones d'alimentation de la ressource, les zones d'écoulement et de transfert ainsi que les zones ou points d'exutoires. La variabilité des phénomènes physicochimiques sera estimée sur au moins un cycle hydrologique.

Pour cela on utilisera tous les outils de l'hydrogéologie, de la reconnaissance aux prédictions. L'utilisation de ces outils ainsi que la précision recherchée seront à adapter selon le projet, le contexte hydrologique et hydrogéologique et les enjeux liés à l'eau recensés dans la zone d'étude élargie.

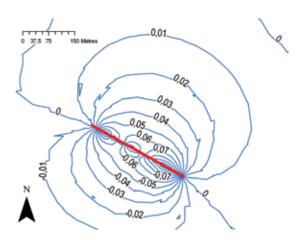


Illustration 20 : résultat d'une modélisation déterministe présentant en plan la zone d'influence d'un ouvrage souterrain c'est-à-dire les différences de potentiel hydraulique (unité en mètre) entre l'état perturbé par l'ouvrage et l'écoulement souterrain naturel. L'ouvrage est représenté en rouge. En amont la différence est positive, en aval négative. (source : HYDROGEAP et CETE de Lyon)

En milieu à porosité d'interstices (milieu alluvial), peuvent être cités :

- les reconnaissances géologiques et géophysiques ;
- la mise en œuvre d'un réseau de piézomètres avec suivi de la variation des niveaux d'eau,
- les piézomètres avec mesures localisées des paramètres hydrodynamiques,
- les mesures in situ des paramètres hydrodynamiques des milieux poreux (perméabilité et coefficient d'emmagasinement),
- les mesures des paramètres physico-chimiques de l'eau,
- la modélisation numérique des écoulements souterrains et éventuellement du transport de masse en solution. Une gradation des modélisations sera établie en fonction du contexte et des enjeux.

En milieu fissuré, les outils listés ci-dessus peuvent être appliqués. Des outils supplémentaires adaptés aux milieux fissurés et karstiques peuvent également être mobilisés comme :

- les inventaires des pertes d'eau en surface et des sources,
- les relevés géomorphologiques de surface,
- le suivi des variations de débit de source et enregistrement en continu de paramètres physico-chimiques (par exemple la température et conductivité de l'eau),
- les relevés de fissuration,
- les essais de traçage,
- les relevés spéléologiques (terrain calcaire).

Selon leur nature, ces outils permettent d'une part de disposer d'un état initial complet de la zone étudiée, et d'autre part d'estimer les impacts du projet vu les modifications que peut apporter l'ouvrage au fonctionnement hydrologique naturel.

MESURES DE RÉDUCTION DES IMPACTS

Au regard des impacts potentiels, il y a lieu de privilégier d'une façon générale une stratégie d'évitement, avant de recourir à d'éventuelles mesures de réduction, voire compensatoires. Pour trouver sa pleine efficacité, cette stratégie doit bien évidemment être mise en œuvre le plus en amont possible dans la conception technique et être basée sur une connaissance suffisamment détaillée de la zone d'étude.

Le *tableau 26* présente des mesures de réduction, en fonction du type d'impact, à mettre en œuvre pour pallier les impacts que la stratégie d'évitement ne suffit pas à éliminer.

Types d'impact		Mesures de réduction
phase chantier	qualitatif (physico-chimie des eaux et bactériologie)	 positionnement des activités polluantes en-dehors des zones naturelles sensibles, des zones de forte vulnérabilité des eaux de surface et des eaux souterraines, hors des périmètres de protection de captage, hors des zones inondables, collecte et traitement des eaux de chantier avant rejet dans le milieu naturel (filtre et bassin pour principalement traiter les MES ainsi que les nitrates en cas de creusement à l'explosif), collecte et traitement des eaux de drainage de massif ayant une qualité différente de celles du milieu récepteur (température et minéralisation), étanchéification des aires de stockage de produits, des parkings et aires d'entretien des engins et contrôle des rejets
Ε	quantitatif (perturbations/ modifications des écoulements)	 gestion raisonnée de l'eau pompée pour le chantier (superficielle et souterraine) donc limitation de la quantité d'eau prélevée / drainée par rapport à la quantité d'eau renouvelable par les précipitations, réduction des débits des venues d'eau en galerie (imperméabilisation, injection).
exploitation	qualitatif (physico-chimie des eaux et bactériologie)	 conserver un réseau séparatif afin que l'eau de drainage du massif ne soit pas contaminée par une pollution accidentelle ou l'eau de lavage, collecte et traitement des eaux de plate-forme avant rejet dont les eaux de lavage.
En phase expl	quantitatif (perturbations/ modifications des écoulements)	 éviter un abaissement du niveau piézométrique sur de grandes surfaces (pour les ouvrages souterrains en tranchée), maintenir l'écoulement des réseaux karstiques coupés par l'ouvrage, maintenir un bilan entre eau drainée et eau renouvelable au sein du massif aquifère.

Tableau 26 : mesures de réduction des impacts (source : CETE de Lyon)

Dans un tunnel en exploitation, le principe général est la mise en place de deux réseaux indépendants :

- un réseau collectant les eaux provenant de la chaussée (pluie, lavage des piédroits) auxquelles peuvent s'ajouter le cas échéant des liquides provenant de déversements accidentels.
- un réseau collectant les eaux de drainage du massif.

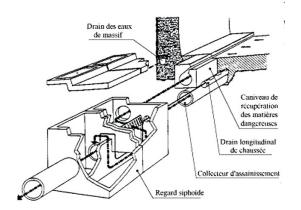


Illustration 21 : principe d'assainissement en tunnel destiné à éviter la propagation de marchandises dangereuses liquides déversées suite à un accident (source : CETU)

Ce principe est détaillé dans le Dossier pilote des tunnels, génie civil, section 7 : assainissement, drainage et réseaux divers (Guide technique) / CETU / 1998 [36].



Photo 20 : bassin de traitement à la descenderie de Modane dans le cadre des travaux de la liaison ferroviaire Lyon Turin (source : CETU)

DISPOSITIONS RÉGLEMENTAIRES

Du point de vue de la législation sur la protection de l'environnement, la *loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006 (LEMA)*, codifiée, et la *directive cadre européenne sur l'eau* (DCE) sont les textes les plus importants qui s'appliquent aux ouvrages souterrains.

Ces textes ont pour but de protéger les eaux souterraines et les eaux de surface contre toute atteinte nuisible d'un point de vue qualitatif et quantitatif.

Au final, les principales références réglementaires utiles sont listées ci-après :

- Directive n°2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau ;
- Directive du Conseil de l'Union européenne n°98/83/CE du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine;
- Directive 2006/118/CE du Parlement européen et du Conseil du 12 décembre 2006 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration ;
- Circulaire n°2005-12 du 28 juillet 2005 relative à la définition du "bon état" et à la constitution des référentiels pour les eaux douces de surface (cours d'eau, plans d'eau), en application de la directive européenne 2000/60/ CE du 23 octobre 2000;

- Circulaire Direction de l'Eau/Ministère de l'Ecologie n°426 du 24 juillet 2002 relative à la mise en œuvre du décret n°2002-202 du 13 février 2002 modifiant ou créant les rubriques 2.5.0, 2.5.2, 2.5.4 et 2.5.5 de la nomenclature "loi sur l'eau" et des trois arrêtés de prescriptions générales pour les opérations soumises à déclaration au titre de ces rubriques ;
- Circulaire CE 2006/18 relative à la définition du "bon état" pour les eaux souterraines, en application de la directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, ainsi qu'à la définition de valeurs-seuils provisoires applicables pendant la phase transitoire ;
- Code de la Santé Publique (Partie législative) Livre II -Protection de la Santé et de l'environnement - Titre II, Sécurité sanitaire des eaux et aliments, Chapitre I^{er} : Eaux potables (articles L1321-1 à L1321-10);
- Code de l'environnement (Partie législative) Livre II Milieux physiques Titre I^{er}, Eaux et milieux aquatiques (articles L.210-1), Chapitre I^{er} : régime général et gestion de la ressource (articles L.211-1 à L211-13);

- Code de l'environnement (Partie législative) Livre IV -Faune et flore - Titre III, Pêche en eau douce et gestion des ressources piscicoles, Chapitre II: Préservation des milieux aquatiques et protection du patrimoine piscicole - section 2: protection de la faune piscicole et de son habitat (articles L.432-2 et L.432-3);
- Code de l'environnement (Partie réglementaire) Livre II -Milieux physiques - Titre Ier, Eaux et milieux aquatiques, Chapitre IV : Activités, installations et usage, Section 1 Procédures d'autorisation ou de déclaration - Sous-section 1 - Champ d'application (Articles R214-1 à R214-5);
- Décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles;
- Décret n°2007-135 du 30 janvier 2007 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides figurant à l'article L. 211-1 du code de l'environnement.

.7 QUELQUES RÉFÉRENCES UTILES

Guides techniques

- [36] Dossier pilote des tunnels, génie civil, section 7 : assainissement, drainage et réseaux divers (Guide technique) / CETU / 1998.
- [37] Prise en compte de la directive cadre eau et des enjeux liés à l'eau et aux milieux aquatiques dans l'élaboration des projets routiers (Guide technique) / SETRA / à paraître en 2010.
- [38] Pollution d'origine routière Conception des ouvrages de traitement des eaux (Guide technique, 83 p) / SETRA / 2008.
- [39] Chantiers routiers et préservation du milieu aquatique -Management environnemental et solutions techniques (Guide technique, 120 p) / SETRA / 2007.
- [40] Dossier pilote des tunnels, génie civil, section 2 : géologie
 hydrogéologie géotechnique (Guide technique) / CETU / 1998.
- [41] Assainissement routier (Guide technique, 92 p) / SETRA / 2006.
- [42] Drainage routier (Guide technique, 91 p) / SETRA / 2006.

Documents sur la connaissance des milieux

- [43] Guide méthodologique de caractérisation initiale des masses d'eau souterraine / BRGM / 2003.
- [44] Pollution et impact d'eaux de ruissellement de chaussées (109 p) / Édition LCPC, Nantes, (109 p) / LEGRET / 2001.

Documents techniques sur les méthodes d'investigations

- [45] Apport des techniques pétrolières de forage et diagraphie à la reconnaissance des grands ouvrages souterrains : les mesures hydrogéologiques et leur utilisation dans le cadre des études de tunnels / revue Tunnels et ouvrages souterrains, n°184 / AFTES / 2004.
- [46] Hydrogéologie (460 p) / Édition Presses de l'Université du Québec, Montréal / BANTON et BANGOY / 1997.
- [47] Hydrogéologie quantitative (215 p) / Ed. Masson, Paris / MARSILY GHISLAIN DE / 1981.

10. MILIEU NATUREL



La fragmentation du paysage, morcellement de l'espace en plusieurs entités isolées les unes des autres, est l'une des premières causes d'atteinte à la biodiversité. Les infrastructures de transport routier sont responsables pour une grande part de cette fragmentation. Elles isolent en effet des territoires et coupent des corridors écologiques.

La création de tunnels permet de réduire cette fragmentation et de ne pas interrompre les corridors biologiques là où ils existent. Le franchissement en tunnel contribue également à diminuer les pollutions sonores, atmosphériques et lumineuses des infrastructures et à éviter les risques de collisions avec la faune sauvage sur le tracé considéré. Les effets négatifs d'un tunnel sur le milieu naturel se concentrent en grande partie lors de la phase chantier. Moins nombreux en phase d'exploitation de l'ouvrage, ces effets négatifs se manifestent essentiellement aux têtes.

0.1 SPÉCIFICITÉS DES TUNNELS VIS-À-VIS DU MILIEU NATUREL

En phase d'exploitation, en-dehors des têtes de tunnel aux abords desquelles peuvent se produire des impacts localisés, le tunnel permet d'une façon générale l'évitement d'habitats naturels sensibles situés en surface, et donc la limitation des impacts directs correspondants. Cela n'exclut cependant pas la possibilité d'impacts indirects sur certains milieux, résultant par exemple de la modification du régime des écoulements souterrains entraînant un assèchement de zones humides.

La phase chantier est par contre une source potentielle de nuisances importantes (bruit, vibrations, pollutions diverses, etc.) pour les milieux naturels terrestres et aquatiques situés aux abords des têtes de tunnel, des puits éventuels, des pistes de circulation des engins et des zones de dépôts.

Dans le cas spécifique de la réalisation d'une tranchée couverte, la destruction puis la restauration des milieux couvrant la tranchée aura un impact important sur le milieu naturel car l'ouverture de la tranchée implique la destruction totale des habitats et de toute ou partie des animaux et végétaux qu'ils abritaient. La restauration *in situ* des milieux détruits ne suffit généralement pas à compenser cet impact fort.

IMPACTS ET ENJEUX LIÉS AU MILIEU NATUREL

10.2.1 En phase chantier

Les impacts liés à la phase chantier sont nombreux. Ils sont exposés dans le *tableau 27*. Certains d'entre eux marqueront durablement les paysages et les écosystèmes traversés.

L'évaluation préalable de ces impacts est délicate car dans bien des cas les informations disponibles en amont sur le déroulement et les contraintes techniques du chantier sont insuffisantes.

Au final, deux impacts potentiels particulièrement sensibles sont à noter en phase chantier : la perte d'habitats et la dégradation de milieux aquatiques.

Le premier concerne essentiellement le cas du recours à une tranchée couverte, dont l'ouverture impactera tout le linéaire concerné, tandis que les travaux de réalisation d'un tunnel ont des effets très limités sur la faune, la flore et les milieux naturels des sites préservés par le tracé. Le second concerne tous les types d'ouvrages souterrains. Les travaux de réalisation d'un tunnel ou d'une tranchée couverte peuvent en effet avoir diverses conséquences préjudiciables sur ces milieux sensibles (pollution par le déversement de fines ou d'autres produits, rabattement de nappes, modification du régime hydraulique de petits cours d'eau, dérangement d'espèces, etc.). Il peut ainsi être recommandé de procéder à une exécution des travaux à sec, c'est-à-dire à l'abri de l'eau des nappes, par la mise en œuvre de mesures spécifiques (*Cf. chapitre 10.5*).

Impact	Mesures de réduction
Destruction de l'habitat	Destruction totale ou partielle d'un ou plusieurs habitats lors des travaux de terrassement, lors des opérations de débroussaillage, de dépôts et d'emprunts de matériaux, de projection de béton sur les parois, de création de seuils pour le passage des engins, etc. : cette destruction s'avère irrémédiable dès lors que le projet occupe le milieu.
Destruction d'individus d'une espèce animale ou végétale	Destruction directe d'individus sous forme adulte (destruction de nichée, d'adultes enfouis dans le sol) ou sous forme larvaire (œuf d'insectes, larves de poissons) et indirecte par des remaniements importants du sol en phase chantier qui peuvent créer des zones attractives pour certaines espèces qui deviennent des pièges mortels (les mares éphémères pour les amphibiens par exemple).
Dégradation de	• Dégradation d'un ou plusieurs habitats de manière ponctuelle, suivi d'un temps de cicatrisation des milieux après travaux variable en fonction des milieux : cette cicatrisation variable est sensible à la problématique des plantes invasives qui colonisent rapidement les milieux perturbés.
l'habitat et diminution de la ressource	• Consommation de l'espace potentiellement préjudiciable pour la disponibilité de la ressource alimentaire comme de la ressource en site de reproduction et d'hivernage.
	• Incidences potentielles au niveau hydraulique sur les milieux (assèchement de zones humides, modification des écoulements, rabattement de nappe, etc.)
Pollution diffuse des cours d'eau et zones humides	Émission de matières en suspension ayant de possibles répercussions sur la qualité des herbiers et sur les frayères à poissons par colmatage, dégradation de la ressource trophique pour des espèces aquatiques.
Dárangamant	• Perturbations des espèces lors de leurs déplacements ou pendant leur période de reproduction et d'hivernage.
Dérangement	• Incidence du bruit et des vibrations : perturbations des colonies de chauve souris.

Tableau 27 : impacts sur le milieu naturel en phase chantier (source : CETE de Lyon)

10.2.2 En phase d'exploitation

Les impacts liés à la phase d'exploitation dans le cas des tunnels sont faibles voire nuls. En effet, un tunnel ou une tranchée couverte évitent la fragmentation des habitats, l'une des causes majeures des atteintes à la biodiversité. L'infrastructure n'est plus une "barrière" aux déplacements de la faune sauvage et à la dispersion des végétaux.

De plus, le franchissement en tunnel évitera ou limitera l'ampleur des opérations compensatoires de réaménagement

foncier des terrains agricoles en surface, qui se révèlent parfois très impactantes sur les milieux naturels (arrachage de haies, drainage, etc.) si elles ne sont pas conduites de façon satisfaisante.

Les impacts négatifs en phase d'exploitation seront donc *a priori* limités aux seuls abords des têtes de tunnels et liés à ceux observés pour une infrastructure à l'air libre. Tout au plus, l'éclairage spécifique des têtes peut attirer les insectes, perturber leur cycle circadien (ensemble des comportements chrono-biologiques qui s'étalent sur 24 heures) et en augmenter la mortalité par prédation.

LO.3 DÉMARCHE D'ÉTUDE

La démarche d'étude complète est synthétisée dans le *tableau 28*. On retiendra que les méthodes de diagnostic mises en œuvre doivent prendre en compte deux aspects importants :

- · les espèces et leurs habitats,
- l'écologie du paysage qui explique le fonctionnement écologique des territoires traversés (trame paysagère, continuums et corridors écologiques, trame verte et trame bleue).

Notons qu'à ce stade, la démarche propre aux tunnels ne sera généralement pas détachable de celle conduite pour l'ensemble de l'infrastructure. Les éléments qui suivent ne sont donc pas spécifiques aux tunnels.

10.3.1 Au stade des études amont

La description de l'état initial, l'évaluation et la hiérarchisation des enjeux se font de façon progressive, avec une approche plus fine et exhaustive au fur et à mesure de l'avancement des études. Il s'agit dans un premier temps, au stade des études d'opportunité, d'identifier les enjeux forts tels que les espaces naturels remarquables avec protection réglementaire. Ces derniers justifient une logique d'évitement et une réflexion sur le positionnement des têtes ou du moins rendent le projet techniquement et réglementairement plus complexe, plus onéreux aussi du fait de la nécessité d'importantes mesures de réduction et/ou de compensation.

Les études préalables permettront ensuite de préciser les enjeux, les impacts potentiels, les motifs de sélection d'une option parmi les différentes options envisagées et les mesures d'atténuation de la solution retenue.

La délimitation de l'aire d'étude doit également être adaptée au stade d'avancement des études (de plus en plus restreinte lorsque le projet se précise). Cette aire d'étude tient compte des spécificités écologiques propres à chaque habitat ou espèce potentiellement impactés par le projet. Les inventaires terrain doivent impérativement tenir compte des cycles biologiques des espèces concernées et donc couvrir une période propice, généralement basée sur un cycle annuel.

Les projets susceptibles d'affecter un site Natura 2000 doivent faire l'objet d'une étude spécifique, appelée étude d'incidences (*Cf. chapitre 1.1.2.2*). L'étude d'incidences évalue essentiellement l'impact du projet sur l'état de conservation des habitats naturels et des espèces pour lesquels le site a été désigné.

Au cours de la phase amont, il est également important d'anticiper les obligations de réalisation des dossiers de demande de dérogation aux mesures de protection des espèces protégées. En cas de capture/transfert, destruction d'une espèce protégée ou de son site de reproduction ou de repos, un dossier de dérogation doit être fourni, pendant la phase de conception, en concertation avec les services de la DREAL avant l'instruction au niveau central par le Conseil National de la Protection de la Nature (CNPN). Ce dossier doit reposer sur des inventaires faunistiques et floristiques précis réalisés pendant la phase amont.

Étono	Approche milieux naturels			
Étape	Objectifs spécifiques	Outils	Échelle de travail	
Études d'opportunité	Identifier, hiérarchiser, cartographier les enjeux Chercher à éviter les enjeux forts dans le positionnement des têtes et du tracé	Analyse des réseaux écologiques régionaux, trame verte et trame bleue Recensement des espaces naturels sensibles (zonages réglementaires) et espèces protégées au titre de la loi de 1976 Contact avec les administrations et organismes concernés par la problématique Recherche bibliographique Cartographie simplifiée (occupation du sol, milieux naturels) des enjeux	1/100 000 à 1/50 000	
Études préalables à l'enquête publique	 Délimiter l'aire d'étude Élaborer les grands principes d'aménagement Affiner les enjeux majeurs Réaliser l'évaluation de l'incidence Natura 2000 Anticiper les dossiers de dérogation au titre des espèces protégées Définir des mesures d'insertion, Proposer des mesures de réduction voire de compensation 	Analyse des corridors écologiques (photointerprétation et inventaires terrain) Inventaires complets des espèces animales et végétales protégées (présence / absence, abondance, occupation de l'espace, domaines vitaux) Inventaire des habitats (typologie, superficie, état de conservation) Inventaire et délimitation des zones humides. Cartographie des contraintes	1/25 000 à 1/5 000	
Avant-Projet et projet	 Affiner les propositions Positionner précisément les équipements Réaliser les dossiers loi sur l'eau et le dossier de dérogation au titre des espèces protégées Définir les modalités concrètes de mise en œuvre des mesures compensatoires 	 Validation terrain des mesures d'insertion Inventaires complémentaires Concertation Définition des modalités de gestion et de suivi des mesures, de l'ouvrage et de ses équipements 	1/5 000 à 1/1 000	
Travaux	Prévenir toutes pollutions accidentelles et destructions de milieux sensibles.	 Définition du cahier des charges environnemental des entreprises Suivi et contrôle chantier 		
Exploitation	Vérifier l'efficacité et la pérennité des mesures Analyser l'impact réel	Définition des indicateurs de suivi et détermination de protocoles		

Tableau 28 : vue d'ensemble du déroulement des études et prise en compte du milieu naturel (source : CETE de Lyon)

10.3.2 Au stade du projet

En phase de conception, des études spécifiques complémentaires sont mises en œuvre, avec pour principaux objectifs :

- une actualisation, au regard de l'affinement du projet, de la liste des habitats et espèces potentiellement impactés;
- une cartographie plus fine des habitats et espèces sensibles au projet, identifiant et localisant de façon précise les habitats et espèces protégées, et leur niveau de protection;
- des propositions de mesures d'atténuation concrètes, tant concernant la phase d'exploitation que la phase chantier (calendrier, secteurs à éviter, modalités particulières de mise en œuvre de certains travaux, etc.). Une attention particulière doit être apportée à la définition opérationnelle des éventuelles mesures compensatoires (maîtrise du foncier, financement pour l'acquisition et la gestion, convention pour la gestion, suivi de l'efficacité des mesures, etc.) qui ne doivent pas rester un simple engagement de principe;

- une définition du cahier des charges environnemental des entreprises qui se verront confier la réalisation des travaux;
- une préparation du suivi environnemental de l'opération et des éventuels bilans à réaliser : il s'agit en particulier de préparer le bilan des grands projets d'infrastructure prévu par l'article 14 de la loi d'orientation sur le transport intérieur (LOTI). Ce dernier va consister à suivre les évolutions liées à l'aménagement et notamment :
 - > les modifications des habitats naturels du point de vue de la flore et de la faune,
 - > le suivi d'espèces (disparition, réduction, apparition),
 - > le suivi de l'efficacité des mesures,
 - > l'évolution de l'écologie du paysage et de la fragmentation.

Enfin, c'est généralement au cours de cette phase de conception, lors de laquelle le niveau de définition du projet devient suffisant pour traiter de façon pertinente certains impacts, que les dossiers suivants doivent être réalisés :

- dossier "loi sur l'eau" comprenant l'étude d'incidence du projet,
- dossiers de demande de dérogation aux mesures de protection des espèces protégées.

MÉTHODES ET MOYENS D'ÉVALUATION

10.4.1 Réalisation d'un état initial

Dans un premier temps, au stade de l'étude d'opportunité, la constitution de l'état initial consiste à recenser l'ensemble des données disponibles sur le milieu naturel et sur les espèces protégées ainsi que les données relatives à la trame verte et à la trame bleue définies aux articles L371-1 à L371-6 du Code de l'Environnement.

A ce stade, l'aire d'étude est large et comprend l'ensemble des zones fonctionnelles du paysage : bassin versant, entité géologique, etc.

Dans un deuxième temps, au stade des études préalables à l'enquête publique, la démarche impose des contraintes en termes de temps et de moyens afin d'obtenir un état initial pertinent et de qualité, condition essentielle pour une bonne étude d'impact. Il importe de graduer les méthodes mises en œuvre en privilégiant dans un premier temps l'exploitation des données déjà disponibles et la prise de contacts avec différents organismes compétents, puis en procédant aux inventaires et reconnaissances de terrain jugées indispensables. Il convient de s'appuyer sur :

- les données bibliographiques (inventaires ZNIEFF -Zones Naturelles d'Intérêt Écologique Faunistique et Floristique-, ZICO -Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux-, Natura 2000, listes rouges des espèces menacées, guides et atlas, études antérieures, revues naturalistes locales, travaux universitaires, etc.) : les zones d'inventaires ou réglementées sont généralement directement accessibles sous forme de données SIG sur les sites Internet des DREAL :
- l'ensemble des personnes et organismes susceptibles d'avoir des informations sur les milieux naturels : administrations (DREAL, DDT), collectivités, associations naturalistes, ONCFS -Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage-, ONF -Office National de la Forêt-, ONEMA, fédérations de pêche, de chasse, etc.
- des investigations de terrain afin de cartographier précisément l'ensemble des habitats naturels et de localiser les espèces protégées.

Il convient de noter que dans le cadre de la réalisation d'un état initial, la saison est un paramètre essentiel. De nombreuses espèces végétales ne sont visibles et identifiables qu'à certaines périodes de l'année. Les dates optimales sont par ailleurs variables selon l'altitude et le type de milieu. Les saisons d'observation de la faune sont elles aussi très variables. Elles dépendent des groupes étudiés et du site (*Cf. tableau 29*)

Phase prestation	Périodes et durées prévisionnelles d'intervention													
	Année n-1			Année n										
mois	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Caractérisation des cours d'eau														
Inventaire des zones humides														
Inventaire Habitats et flore protégée														
Inventaire Chiroptère														
Inventaire autres mammifères														
Castor														
Loutre														
Grands mammifères (cerf, sanglier)														
Autres mammifères														
Inventaire Amphibiens et Reptiles														
Amphibiens														
Reptiles														
Inventaire Insectes														
Inventaire Mollusques														
Inventaire Poissons et Crustacés														
Crustacés														
Poissons														
Inventaire Oiseaux														
Oiseaux migrateurs														
Oiseaux nicheurs														
Oiseaux hivernants														

Tableau 29 : exemple de calendrier prévisionnel des périodes d'intervention pour les relevés de terrain afin de réaliser l'état initial du milieu naturel. La couleur verte désigne une période propice. Le vert foncé désigne des périodes plus propices que le vert clair. (source : CETE de Lyon)

10.4.2 Méthode d'évaluation des impacts sur le milieu naturel

Les méthodes d'évaluation des impacts sur le milieu naturel sont souvent qualitatives et à dire d'expert, avec la possibilité de quantifier certaines incidences telles que les surfaces impactées, le linéaire de cours d'eau recalibrés ou encore les effectifs des populations impactées. Le recours à des modèles plus complexes est également envisageable pour préciser par exemple les conditions de dispersion de certaines espèces.

Le *tableau 30* propose une méthode pour hiérarchiser les enjeux relatifs au milieu naturel.

Impact	Description de l'impact				
Faible	 Absence d'habitats naturels remarquables tels que ceux visés à l'annexe 2 de la Directive Habitat, absence de ZNIEFF, Absence d'espèces animales ou végétales remarquables Non coupure de corridor écologique 				
Moyen	 Emprise sur des habitats remarquables tels que des Znieff de type 2 ou des réserves de chasse Présence d'espèces considérées comme assez rares à l'échelle départementale ou régionale 				
Fort	 Emprise sur des habitats remarquables à l'échelle nationale (Znieff de type 1, ENS -Espaces Naturels Sensibles-, ZICO, sites de conservatoire, etc.) Emprise sur des zones humides d'importance nationale ou régionale, sensibles à une modification de leur alimentation en eau Présence d'espèces considérées comme rares à l'échelle départementale ou de nombreuses espèces rares à l'échelle locale, espèces mentionnées sur liste rouge 				
Majeur	 Emprise sur des sites Natura 2000 et secteurs protégés par un arrêté de protection de biotope, réserves naturelles Emprise sur un parc régional, national ou une réserve nationale Présence d'espèces animales ou végétales bénéficiant de mesures de protection (nationale ou régionale) Présence d'espèces inscrites à la directive européenne Habitats 				

Tableau 30 : hiérarchisation réglementaire admise des niveaux de sensibilité et de vulnérabilité des espèces et des habitats naturels vis-à-vis d'un projet d'infrastructure (CETE de Lyon)

0.5 MESURES DE RÉDUCTION DES IMPACTS

En premier lieu, les mesures d'évitement ou de suppression sont à rechercher. Ces mesures visent à supprimer les effets négatifs par évitement des zones à enjeux. Il peut s'agir par exemple de la modification du positionnement des têtes pour éviter une zone humide ou encore du choix d'une saison adaptée pour les travaux (hors période de reproduction d'une espèce donnée par exemple).

En complément, les mesures de réduction consisteront à adapter les caractéristiques du projet pour atténuer une incidence possible sur le site. Il s'agit de mesures situées dans l'emprise du projet, réalisées avant ou simultanément aux travaux, telles que la mise en place de bassins de régulation et de traitement des eaux avant rejet en milieu sensible. Parmi ces mesures, peut figurer aussi l'exécution des travaux à sec pour limiter l'impact sur les milieux aquatiques. Les travaux s'effectuent alors à l'abri de l'eau des nappes, par la mise en place d'enceintes ou de structures étanches qui évitent tout rabattement de nappe. Il faut souligner par ailleurs que la présence de nappes profondes en charge, même lorsque leur toit est situé à un niveau très inférieur à celui du fond de fouille, peut imposer d'adopter des dispositions particulières d'exécution, comme la réalisation de puits de décharge.

En dernier recours, peuvent être mises en œuvre des mesures dites compensatoires, pour compenser les effets dommageables qui ne peuvent être supprimés ou réduits suffisamment. Elles introduisent une contrepartie sur un domaine similaire, au niveau du site impacté ou en-dehors. Il peut s'agir par exemple, de la création d'un milieu humide de substitution pour compenser la disparition d'une zone humide, de la création de nouveaux corridors de déplacement de la faune, de l'acquisition et la mise en gestion d'un milieu naturel intéressant et menacé. Généralement réalisées hors emprise du projet, ces mesures doivent être définies de façon très opérationnelle pour donner toute garantie de mise en œuvre effective et d'efficacité. L'attention doit notamment être portée sur la définition d'objectifs clairs au regard de la compensation recherchée, sur la maîtrise du foncier concerné, sur les partenariats à proposer, sur la gestion par un ou plusieurs organismes compétents, le financement et la pérennité des moyens de gestion.

Des mesures de sauvegarde ou de conservation peuvent être également prises dans le cas où des espèces ou espaces identifiés comme patrimoniaux au titre de l'article L411-1 du Code de l'Environnement. Le maître d'ouvrage devra alors au préalable réaliser une demande d'autorisation de dérogation au ministère de tutelle. La réalisation de ces demandes ne garantissant pas l'accord, l'évitement devra donc être préféré.

Enfin, dans d'autres cas, le maître d'ouvrage peut participer à des opérations facultatives, relevant de son initiative et non exigées par la réglementation. Il s'agit de profiter de l'opportunité que constitue un projet pour améliorer la protection de la nature. Ces mesures d'accompagnement sont généralement destinées à optimiser les effets positifs d'un projet et à en maîtriser les effets induits. Il peut s'agir de la création et la mise en place d'observatoires environnementaux ou encore de la contribution à la remise en valeur écologique de carrières voisines du projet.

10.6

DISPOSITIONS RÉGLEMENTAIRES

10.6.1 Directives européennes

Au niveau de la réglementation européenne, trois directives sont à citer :

- la directive 79/409/CEE du 2 avril 1979 modifiée concernant la conservation des oiseaux sauvages dite directive "Oiseaux",
- la *directive* n°92/43/CEE du 21/05/92 "Habitats-Faune-Flore", concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages, dite directive "Habitats",
- la *directive* n°2000/60/CE du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Les annexes I (types d'habitats naturels d'intérêt communautaire) et II (espèces animales et végétales d'intérêt communautaire) à la directive "Habitats" énumèrent les habitats et les espèces dont la conservation nécessite la désignation de Zone Spécial de Conservation (ZSC). Certains de ces habitats ou espèces sont qualifiés de prioritaires. Couplées aux Zones de Protection Spéciale (ZPS) désignées en vertu de la Directive "Oiseaux", les ZSC constituent le réseau Natura 2000.

Les articles 12 (espèces animales) et 13 (espèces végétales) de la Directive Habitats exigent de mettre en place à la fois au sein et en-dehors du réseau Natura 2000 un système assurant une protection stricte des espèces menacées citées dans l'Annexe IV.

Les directives "Oiseaux" et "Habitats" s'appliquent au travers de leur transposition dans le droit français, transposition portée notamment par les articles *L414-4* et suivants du Code de l'Environnement. Cette réglementation exige la réalisation d'une étude d'incidences (art. R414.23 CE) pour les projets ou programmes dont la réalisation est de nature à affecter de façon notable un site Natura 2000. Une circulaire Environnement DNP/SDEN 2004-1 du 5 octobre 2004 précise les éléments attendus dans le cadre de cette évaluation des incidences.

L'originalité de ce dispositif tient à ce que, dans certains cas, la Commission européenne doit donner son avis sur les mesures compensatoires envisagées.

10.6.2 Droit Français

Le cadre général est fixé par :

- la *Loi* n°76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature (décret d'application n°77-1141 du 12 octobre 1977 modifié par le décret n°93-245 du 25 février 1993),
- la *Loi* n°94-477 du 10 juin 1994 sur la convention cadre diversité biologique (décret portant publication de la Convention n°95-140 du 6 février 1995, entré en vigueur le 29 septembre 1995).
- Par ailleurs, la *circulaire* n°96-21 du 11 mars 1996 précise comment prendre en compte l'environnement et le paysage dans les projets routiers.

Enfin, des réglementations spécifiques s'appliquent :

- aux espèces protégées (articles L411-1 et suivants et R411-1 et suivants) du Code de l'Environnement: la protection des espèces est basée sur une liste d'espèces protégées sur un territoire donné fixé dans des arrêtés nationaux ou régionaux. Un décret en Conseil d'État détermine les conditions dans lesquelles est fixée la liste limitative des espèces animales et végétales. Celle-ci est établie après avis du Conseil National de Protection de la Nature (CNPN) par arrêté du ministre chargé de la protection de la nature. Ces arrêtés doivent préciser la durée des interdictions permanentes ou temporaires, prises en vue de permettre la reconstitution des populations naturelles et la partie du territoire sur lequel elles s'appliquent.
- · aux milieux aquatiques et zones humides avec :
 - > la *loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006* sur l'eau et les milieux aquatiques,
 - > la définition des Zones humides par les *articles* L211-1 et R211-108 du Code de l'Environnement,

- > la *loi n°2005-157 du 23 février 2005* sur le Développement Territoires Ruraux (DTR) (*article L.211-1 à L.211-3 du Code de l'Environnement*),
- > les *articles L212-1* et *L212-5-2* du Code de *l'Environnement* relatifs à la portée juridique des SDAGE et des SAGE.
- à la protection réglementaire des espaces avec :
 - > les arrêtés de protection de biotope,
 - > les parcs nationaux,
 - > les parcs naturels régionaux,
 - > les zones humides d'intérêt environnemental particulier,
 - > les zones stratégiques pour la gestion de l'eau,
 - > les réserves naturelles nationales et régionales,

- > les réserves biologiques domaniales et forestières, et les forêts de protection,
- > les réserves nationales de chasse et faune sauvage,
- > les sites classés et inscrits.
- à la trame verte et à la trame bleue (articles L371-1 à L371-6 du Code de l'Environnement).

Enfin, les documents relevant du "Porté à connaissance" font aussi partie du paysage réglementaire avec les Znieff, les espaces naturels sensibles, les listes rouges d'espèces menacées, les sites Ramsar (convention sur les zones humides d'importance internationale), les réserves de la biosphère ou encore les Terrains des Conservatoires nationaux littoral et botanique.

10.7 QUELQUES RÉFÉRENCES UTILES

- [48] Prise en compte des milieux naturels dans les études d'impact (Guide méthodologique) / DIREN Midi-Pyrénées / novembre 2002.
- [49] États des lieux de la connaissance et des attentes des acteurs sur l'impact des infrastructures de transport terrestre sur les paysages et les écosystèmes, Biotope & BioGéo / MEDD / janvier 2007.
- [50] Les outils de protection des espaces naturels en France, (guide technique) / SETRA / octobre 2004.
- [51] Natura 2000, Principes d'évaluation des incidences des infrastructures de transports terrestres (note d'information)/ SETRA / juin 2007.
- [52] Natura 2000, Biodiversité et infrastructures de transports terrestres (note d'information) / SETRA / septembre 2007.

11. PAYSAGE ET PATRIMOINE



Depuis la loi sur la protection et la mise en valeur des paysages de janvier 1993, ce ne sont plus les seuls sites exceptionnels qui doivent être protégés. En effet, l'ensemble des paysages, ordinaires et exceptionnels, doivent désormais être pris en compte pour la définition des politiques d'aménagement des territoires.

Par ailleurs, la convention européenne du paysage, entrée en vigueur en France le 3 juillet 2006, donne une dimension complémentaire au paysage et aux objectifs de qualité paysagère qui doivent être construits à partir d'un dialogue et avec la participation des populations. Cette convention définit le paysage comme étant une "partie de territoire, telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et / ou humains et de leurs interrelations". Le paysage participe ainsi à l'identité d'un lieu.

Le patrimoine matérialise plus précisément cette identité. Le patrimoine architectural a été le premier à être pris en considération par la réglementation, mais il ne s'agit que d'une partie du patrimoine à laquelle il faut ajouter les monuments naturels protégés (sites classés ou inscrits) ainsi que les vestiges archéologiques. Ainsi le Code du Patrimoine définit ce dernier comme "l'ensemble des biens, immobiliers ou mobiliers, relevant de la propriété publique ou privée, qui présentent un intérêt historique, artistique, archéologique, esthétique, scientifique ou technique".

Paysage et patrimoine sont donc clairement imbriqués. Dans ce contexte, un maître d'ouvrage peut opter pour un passage en tunnel ou en tranchée couverte afin de préserver un paysage ou des éléments patrimoniaux, ou encore afin de restaurer un paysage dégradé par une infrastructure routière, en milieu urbain notamment.

11.1 SPÉCIFICITÉS DES TUNNELS VIS-À-VIS DU PAYSAGE ET DU PATRIMOINE

A l'instar de tout chantier, la construction d'un tunnel affecte le paysage avec ses installations de chantier, ses terrassements et ses déblais. Si dans le cas d'un tunnel l'encombrement du chantier est *a priori* circonscrit aux abords des têtes de l'ouvrage, une tranchée couverte présente pour sa part une emprise au sol plus importante.

Du point de vue de la conservation du patrimoine bâti, de tels chantiers appellent aussi une certaine vigilance dans la mesure où les techniques utilisées ne sont pas sans effet sur la stabilité du sol (*Cf. chapitres 2, 3 et 4*).

En phase d'exploitation les incidences sont *a priori* limitées, un tunnel étant discret par nature. Les éléments visibles susceptibles d'altérer l'ambiance paysagère sont toutefois plus nombreux qu'il n'y paraît. En complément des têtes de l'ouvrage, selon les cas, on pourra trouver tout ou partie des équipements suivants :

- les locaux techniques, y compris les stations de ventilation,
- · les antennes radio, parfois montées sur pylône,
- les bouches ou cheminées de ventilation,
- les issues de secours : ces dernières doivent permettre une communication directe avec l'extérieur chaque fois que cela est réalisable dans des conditions raisonnables,

• les bossages : dans le cas des tranchées couvertes, l'intégration d'un panneau de signalisation ou d'un accélérateur dans l'ouvrage peut susciter un besoin ponctuel en hauteur supplémentaire. Cette hauteur peut se répercuter par une surélévation du terrain au droit de l'équipement à l'extérieur de l'ouvrage.

La problématique est par conséquent sensiblement différente de celle présentée par une infrastructure linéaire à l'air libre qui participe à la structuration du paysage. Pour un tunnel, le travail paysager consiste plutôt à intégrer les éléments ponctuels visibles. Cette intégration peut s'avérer délicate en milieu urbain, où les contraintes sont plus fortes et l'espace plus restreint qu'en milieu naturel. Toutefois, en milieu naturel, les matériaux employés, béton projeté sur de grandes surfaces pour assurer le maintien du terrain dans l'environnement des têtes par exemple, contribuent aussi à rendre l'exercice difficile.

Globalement, le positionnement des têtes de tunnel et leur architecture participent significativement à cette intégration paysagère, ainsi qu'à la perception du paysage par l'usager (Cf. Guide technique du CETU relatif à l'architecture des têtes de tunnels [53]).

11.2 IMPACTS ET ENJEUX LIÉS AU PAYSAGE ET AU PATRIMOINE

La relation tunnel / paysage est à examiner sous deux angles différents :

- le tunnel comme élément du paysage vu hors du tracé routier, tant en phase chantier qu'en exploitation,
- le tunnel vu par l'usager qui va découvrir une succession de paysages, avec parfois des séquences paysagères très contrastées entre l'entrée et la sortie du tunnel.

11.2.1 Paysage

11.2.1.1 En phase chantier

Les impacts de la phase chantier sont directement générés par les travaux et concernent uniquement le premier angle. Ces impacts sont liés à la présence :

- de terrassements importants qui s'imposent d'emblée à la vue d'un observateur,
- de dépôts divers dont le stockage des matériaux,
- des installations de chantier: baraques de chantier, transformateurs, engins de travaux, etc.



Photo 21 : chantier du tunnel de Bois de Peu en Franche-Comté (source : CETU)

11.2.1.2 En phase d'exploitation

Des éléments ponctuels du tunnel, étrangers au paysage initial, viennent s'incorporer au paysage. Ces éléments peuvent être en opposition avec l'ambiance paysagère existante. Cet impact est direct et permanent et il convient de traiter convenablement l'intégration paysagère de ces éléments.

Par ailleurs un tunnel peut avoir un impact positif indirect important dans un paysage. Le passage en tunnel peut en effet détourner une partie du trafic, le rendre invisible et libérer de la surface, offrant ainsi la possibilité d'aménager le paysage. Il peut s'agir de :

- la préservation d'un paysage existant dans le cadre d'un tracé neuf,
- la restauration de paysages dégradés par le passage d'une infrastructure routière, l'objectif étant de remettre en l'état le paysage tel qu'il était avant l'implantation de la route,
- la création de nouveaux paysages : l'enterrement d'une route traversant une ville ou un quartier offre l'opportunité de recomposer le paysage urbain.

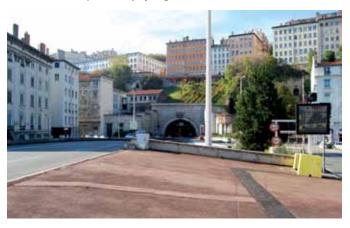


Photo 22 : tunnel de la Croix Rousse à Lyon (source : CETU)

Du point de vue de l'usager, le tunnel est un lieu de transition entre deux paysages, parfois de nature différente. L'impact d'un tunnel sur la perception qu'un usager peut se faire d'un paysage va dépendre en partie du traitement architectural des têtes du tunnel, mais également du point de vue sous lequel un paysage va être découvert à la sortie du tunnel.



Photo 23 : ancienne route des Grands Goulets dans le Vercors (source : CETU)

11.2.2 Patrimoine et archéologie

Le patrimoine est l'objet de plusieurs enjeux :

- paysager, par l'empreinte des monuments et de leurs périmètres de protection sur l'environnement,
- de société, en tant que lieu de mémoire et d'image, voire de symbole d'un pays, d'une région, d'une ville, etc.
- scientifique, par les connaissances historiques, techniques, culturelles, etc. qu'apporte l'étude des monuments et des sites archéologiques,
- · culturel.
- et économique, par le tourisme qu'il peut générer.

11.2.2.1 Phase chantier

La conservation du patrimoine peut être compromise par les nuisances de chantier telles que les vibrations ou les tassements (*Cf. chapitres 2 et 3*).

Le patrimoine archéologique peut également être menacé de destruction. La sensibilité est variable et dépend essentiellement des trois facteurs suivants :

- le potentiel archéologique de la zone,
- le type d'ouvrage,
- la profondeur de l'ouvrage.

Ainsi la sensibilité sera bien plus élevée pour une tranchée couverte en milieu urbain que pour un tunnel traversant un massif granitique en rase campagne. Dans le premier cas les terrains sont remaniés depuis la surface et sur tout le linéaire de l'ouvrage. Ces terrains peuvent abriter des traces d'occupation fort ancienne. Dans le second cas, seules les têtes peuvent affecter des terrains dont le potentiel archéologique est généralement faible.

La législation encadre fortement les projets d'aménagement sur cet aspect, qui entre dans le champ de l'archéologie préventive. Le Code du Patrimoine assigne à cette dernière une mission de service public. Son objet est "d'assurer, à terre et sous les eaux, dans les délais appropriés, la détection, la conservation ou la sauvegarde par l'étude scientifique des éléments du patrimoine archéologique affectés ou susceptibles d'être affectés par les travaux publics ou privés concourant à l'aménagement. Elle a également pour objet l'interprétation et la diffusion des résultats obtenus".

Ainsi la réalisation d'infrastructures offre davantage l'opportunité d'accroître les connaissances archéologiques que le risque de destructions fortuites.

11.2.2.2 Phase d'exploitation

L'impact consiste principalement en la dégradation de l'ambiance immédiate ou lointaine des monuments et des sites, comme par exemple la covisibilité d'éléments techniques du tunnel tels qu'une cheminée ou une station de ventilation avec un monument. Toutefois, ces éléments techniques peuvent aussi prendre des formes architecturales qui facilitent leur intégration.

Un tunnel peut également avoir un impact positif, en permettant une amélioration de l'environnement d'un bâtiment duquel il éloigne le trafic. Cet aspect est à intégrer au travail d'aménagement paysager global du tracé.

N'oublions pas enfin que certains tunnels sont eux-mêmes des éléments de patrimoine, vestiges d'une époque ou d'une technologie.

11.3 DÉMARCHE D'ÉTUDE

La démarche d'étude complète est synthétisée dans le *tableau 31*. Elle distingue les aspects relevant spécifiquement du paysage de ceux relevant spécifiquement du patrimoine.

On retiendra par ailleurs qu'il est indispensable de s'entourer de personnes compétentes sur ces sujets. La recherche d'intervenants variés, aux sensibilités complémentaires, sera privilégiée. En particulier, doivent être sollicitées les compétences d'un paysagiste et d'un architecte spécialisé dans les ouvrages d'art. Ces compétences doivent être recherchées suffisamment tôt dans les études.

Étape	Actions à mener pour le thème "paysage"	Actions à mener pour le thème "patrimoine"
Études d'opportunité	 caractériser les unités paysagères, décrire les transitions (rural vers urbain par exemple) et envisager les évolutions possibles, mettre en évidence les principales sensibilités. 	 recenser les structures et éléments faisant l'objet d'une procédure de protection, établir un aperçu patrimonial de l'aire d'étude, identifier les grands sites connus afin de les éviter.
Études préalables à l'enquête publique : comparaison des variantes	 évaluer le potentiel d'insertion de chaque variante afin de dégager les variantes favorables, les variantes défavorables et celles qui sont favorables sous conditions, identifier les impacts prévisibles (positifs et négatifs), prévoir les mesures envisageables, définir les grands principes architecturaux. 	évaluer la sensibilité aux différentes variantes du projet de chaque élément, recenser et localiser les contraintes archéologiques, du patrimoine bâti, des sites et des zones de protection attenantes, évaluer les risques: détérioration ou destruction, altération de l'environnement immédiat, passage au travers d'une zone au potentiel archéologique élevé, etc., évaluer les opportunités de mises en valeur, se concerter avec les services compétents (DRAC -Direction régionale des affaires culturelles- et SDAP -service départemental de l'architecture et du patrimoine-) sur les enjeux patrimoniaux et le choix de variantes.
Études préalables à l'enquête publique : étude de la variante proposée	Proposer un aménagement paysager et réaliser des esquisses paysagères en précisant : • les effets recherchés (valorisation ou au contraire dissimulation), • la faisabilité technique et réglementaire des partis d'aménagement, • le traitement architectural des têtes de tunnel, • les principes de mise en valeur du paysage, • le séquencement des paysages pour l'usager, • l'évaluation des coûts.	Évaluer plus finement les impacts du projet et les mesures à prendre par : • l'amélioration des connaissances sur le patrimoine dans la bande d'étude de la variante proposée, • la consultation obligatoire de la DRAC pour avis sur le dossier.
Études de conception	Préciser les propositions paysagères et architecturales :	Réaliser les procédures relevant de l'archéologie préventive (Cf.11.4.2)

Tableau 31 : vue d'ensemble du déroulement des études et prise en compte du paysage et du patrimoine (source : CETE de Lyon)

11 4

MÉTHODES ET MOYENS D'ÉVALUATION

Traiter correctement le paysage et le patrimoine requiert d'en intégrer toutes les composantes en amont des études et donc de réaliser un état initial le plus exhaustif possible. Ce dernier ne suffit pas à déceler les éléments cachés du patrimoine qui relèvent pour leur part de l'archéologie préventive.

11.4.1 Réalisation d'un état initial

11.4.1.1 Paysage

L'état initial doit aboutir à la mise en évidence des principales sensibilités paysagères. Ce travail se fait par :

- la définition des unités paysagères selon les critères géographiques, historiques, culturels, etc. ainsi que la définition des zones d'ambiance paysagère homogène,
- la définition d'une typologie visuelle d'après les différentes composantes physiques, végétales, architecturales, etc. et le recueil des espaces particuliers dont ceux relevant du patrimoine. Ces données nécessitent une recherche bibliographique (données sur l'agriculture, les espaces naturels, l'urbanisme, etc.) mais également un travail de terrain qui s'accompagne d'une campagne photographique. Ce travail fait aussi l'objet d'un rendu cartographique représentant les sensibilités paysagères en distinguant les zones à éviter, les zones délicates et les zones sans enjeux particuliers qui sont autant d'éléments importants en vue de la comparaison des partis d'aménagement.

Ce travail est enfin à enrichir par une analyse des modes de découverte de l'ouvrage depuis les zones d'habitat et depuis l'infrastructure ainsi que par une analyse des usages du territoire.

Ce travail sera ensuite utilisé pour la comparaison des variantes afin notamment de le croiser avec les éléments techniques de chaque variante qui interfèrent avec le paysage (localisation et architecture des têtes, stations de ventilation, locaux techniques, etc.) et de préciser les mesures envisagées pour une intégration paysagère réussie.

11.4.1.2 Patrimoine

La réalisation d'un état initial relatif au patrimoine passe par le recensement :

- des monuments et sites classés ou inscrits avec leur périmètre de protection, des périmètres des Zones de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager (ZPPAUP),
- des zones archéologiques connues ainsi que des zones potentiellement riches.

Ces informations peuvent être recueillies par l'étude des cartes IGN et la consultation de bases de données en ligne telle que la base Architecture-Mérimée du Ministère de la Culture. Les services concernés tels que les DRAC ou les SDAP sont également à associer.

Ce recensement est ensuite cartographié en distinguant la nature et le niveau de protection des différentes composantes du patrimoine.

Enfin, la sensibilité du patrimoine doit aussi être analysée au regard de sa fragilité structurelle face aux nuisances prévisibles du chantier que peuvent être notamment les vibrations ou les phénomènes de tassement (*Cf. chapitres 2 et 3*). A ce titre, il est nécessaire de se rapprocher des services ayant la gestion du patrimoine bâti identifié.

11.4.2 Procédure d'archéologie préventive

Sont présumés faire l'objet de prescriptions archéologiques préalablement à leur réalisation, tous les projets d'aménagement affectant ou susceptibles d'affecter des éléments du patrimoine archéologique.

A ce titre, le préfet de région doit être saisi sur la base d'un dossier de déclaration comportant notamment :

- · la description des travaux,
- · l'emplacement prévu,
- la superficie qui sert de base au calcul de la redevance due au titre de l'archéologique préventive,
- l'impact sur le sous-sol.

Pour les projets soumis à étude d'impact, le préfet dispose alors d'un délai de deux mois pour formuler des prescriptions. Si le projet est susceptible d'affecter des éléments du patrimoine archéologique, le préfet de région peut prescrire la réalisation d'un diagnostic archéologique et, si des éléments du patrimoine archéologique présents sur le site sont déjà connus, prendre des mesures spécifiques telles que l'obligation de conserver tout ou partie du site ou encore modifier la consistance du projet.

Dans le cas où un diagnostic est prescrit, plusieurs cas de figure peuvent se présenter :

- le diagnostic est négatif et le préfet autorise l'aménageur à entreprendre ses travaux;
- le diagnostic est positif mais les vestiges archéologiques sont mal conservés ou ne présentent pas d'intérêt scientifique conduisant ainsi le préfet à autoriser l'aménageur à entreprendre ses travaux;
- le diagnostic est positif et le préfet décide de la réalisation d'une fouille archéologique ou de la modification du projet d'aménagement;
- le diagnostic est positif et a permis la découverte de vestiges exceptionnels qui devront être conservées in situ : le préfet demande à l'aménageur d'intégrer ces vestiges dans son projet d'aménagement.

MESURES DE RÉDUCTION DES IMPACTS

11.5.1 Paysage

Même si selon le mode de creusement, il est possible de limiter la surface du chantier, il est globalement difficile d'atténuer l'effet des travaux sur l'ambiance paysagère en cours de chantier. Il est toutefois possible d'en limiter la durée par une remise en état des lieux dès l'achèvement des travaux, ainsi que par une exécution rapide de la végétalisation lorsqu'elle fait partie des mesures d'intégration.

S'agissant de la phase exploitation, une série de mesures permet de réduire voire de supprimer l'impact visuel des éléments techniques d'un tunnel :

- l'enterrement des installations (locaux techniques, stations de ventilation, etc.),
- · la dissimulation par la végétation,
- la construction de "faux-immeubles" destinés à abriter les installations,
- l'intégration à l'ambiance paysagère locale : imitation de la roche, imitation de l'environnement architectural, etc.

Outre ces mesures destinées à combattre les impacts négatifs, des mesures d'accompagnement permettent d'exploiter au mieux les impacts positifs (*Cf.* [53]) :

- la monumentalisation des têtes de tunnel lorsqu'elles marquent une entrée de ville ou un passage franc d'un paysage à un autre,
- la création de nouvelles ambiances paysagères (jardins ou parc sur la partie couverte d'une tranchée couverte par exemple, etc.),
- des mesures de réaménagement urbain lorsque le projet conduit à libérer des espaces en surface.



Photo 24 : station de ventilation de la tranchée couverte de Montolivet sur la L2 Est à Marseille (source CETU)

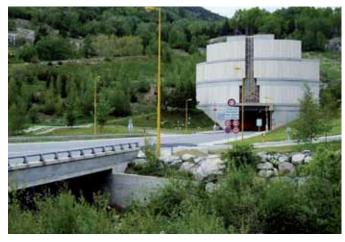


Photo 25: tunnel de Puymorens dans les Pyrénées (source CETU)

11.5.2 Patrimoine et archéologie

Lors de la phase chantier, le patrimoine présente une sensibilité toute particulière vis-à-vis de nuisances telles que les vibrations ou les tassements de sols. Les mesures permettant de réduire ces nuisances sont détaillées aux chapitres thématiques correspondants.

Il est toutefois utile de rappeler en la matière l'importance du choix des techniques de creusement d'une part et du contrôle de l'évolution des bâtiments par des mesures sur site durant l'exécution des travaux d'autre part.

Pour la phase d'exploitation, il peut avoir été décidé soit d'exploiter la covisibilité patrimoine / infrastructure, soit au contraire d'en limiter les effets.

Dans le premier cas, les mesures d'accompagnement à prendre concernent la mise en valeur du patrimoine, à traiter conjointement avec les mesures d'intégration paysagère. Dans le second cas, il s'agit de réduire l'impact visuel en mettant en place des protections visuelles adaptées, à traiter là encore conjointement avec les mesures d'intégration paysagère.

Concernant l'archéologie, toutes les mesures concernant l'archéologie préventive (*Cf. chapitre 11.4.2*) garantissent la sauvegarde du patrimoine. En-dehors de ces obligations légales, l'aménageur peut également décider, en mesure d'accompagnement, de réaliser des expositions autour d'éventuelles découvertes archéologiques.

11.6 DISPOSITIONS RÉGLEMENTAIRES

En l'absence de textes spécifiques aux tunnels, ce sont les textes généraux auxquels sont soumises toutes les infrastructures qui s'appliquent.

La réglementation relative au paysage repose essentiellement sur la *loi* $n^{\circ}93-24$ *du* 8 *janvier* 1993 relative à la protection et la mise en valeur des paysages. Cette dernière a été retranscrite depuis dans les différents codes traitant du paysage et notamment :

- le Code de l'environnement,
- le Code de l'Urbanisme,
- le Code Rural.

Le paysage a fait par ailleurs l'objet de deux circulaires importantes :

- la *circulaire n°96-21 du 11 mars 1996* relative à la prise en compte de l'environnement et du paysage dans les projets routiers,
- la circulaire du 31 mars 2005 relative à la politique du "1 % paysage et développement" sur le réseau routier national : elle instaure le principe que 1% du montant de l'enveloppe financière affectée à une infrastructure peut participer à la valorisation paysagère et au développement économique et touristique (Cf. [54] et [55]).

Enfin, notons le *décret n°2006-1643 du 20 décembre 2006* portant publication de la convention européenne du paysage signée à Florence le 20 octobre 2000.

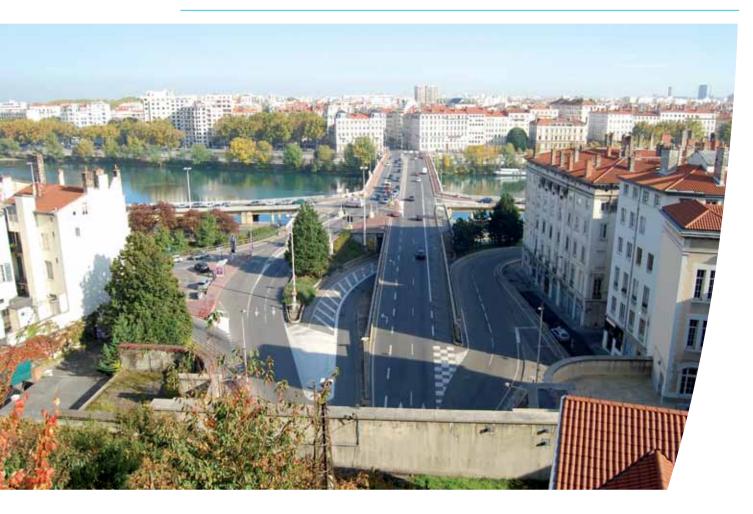
La réglementation relative au patrimoine et à l'archéologie est concentrée pour sa part au sein du *Code du Patrimoine* avec des textes relatifs :

- à l'archéologie préventive (Livre V, Titre II),
- aux monuments historiques, aux sites et espaces protégés (Livre VI, respectivement Titres II, III et IV).

11.7 QUELQUES RÉFÉRENCES UTILES

- [53] Architecture des têtes de tunnels (Guide technique) / CETU/juillet 1991.
- [54] Mise en œuvre de la politique du 1% Paysage et Développement - Application de la circulaire du 31 mars 2005 (Fiche et note d'information) / SETRA / juin 2008.
- [55] Politique 1 % Paysage et Développement, les itinéraires de découverte (Guide méthodologique) / SETRA / décembre 2003.
- [56] Le bloc-diagramme paysager : un outil d'analyse spatiale pour l'aménagement du territoire (Fiche et note d'information n°66) / SETRA / janvier 2001.
- [57] Insertion d'une infrastructure routière Concilier terrassements et enjeux paysagers (Fiche et note d'information n°84) / SETRA / juin 2008.
- [58] Paysage et infrastructures de transport (Guide méthodologique) / SETRA / juin 2008.
- [59] Plantations, environnement, paysage Recueil d'expériences (document technique) / CEERD / avril 2002.
- [60] La végétalisation, un outil d'aménagement (Guide technique)/ SETRA, Ministère de l'Environnement / 1994.
- [61] Gestion des dépôts de matériaux excédentaires en zone agricole (Fiche et note d'information n°68) / SETRA / juin 2002.

12. CADRE DE VIE ET ACTIVITÉS HUMAINES



Ce chapitre est centré sur les impacts qui n'ont pas encore été traités dans le document, le lecteur devant garder à l'esprit que

chaque thématique déjà traitée (bruit, air, etc.) a toutefois des incidences à sa manière sur le cadre de vie et les activités.

12.1 SPÉCIFICITÉS DES TUNNELS ENVERS LE CADRE DE VIE ET LES ACTIVITÉS

Il est généralement attendu d'un tunnel qu'il améliore le cadre de vie ou du moins qu'il le détériore moins que ne le ferait un tracé à l'air libre.

En milieu rural, un passage en tunnel permet de minimiser les impacts sur les activités rurales.

En milieu urbain un passage en tunnel ou en tranchée couverte peut être une réponse à un cadre de vie dégradé par l'importance du trafic automobile. Dans cette optique, le tunnel permet d'atténuer les nuisances environnementales liées au trafic routier en surface et d'exploiter les surfaces libérées à d'autres fins.

Plus globalement, un tunnel participe à l'aménagement ainsi qu'à l'organisation de la ville et a des répercussions socio-économiques. Une analyse complète du sujet ne se limite pas au seul champ de l'environnement et renvoie à des questions plus larges dont celles du développement durable. Ce n'est

pas à proprement parler l'objet du présent document qui se limite au sujet de l'environnement mais il est à noter que des réflexions sont en cours sur cette thématique. Ainsi, en 2006, dans l'exposé des motifs d'un colloque dédié à la contribution du sous sol pour la ville durable, l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain indiquait :

"Les grands enjeux climatiques, énergétiques, écologiques vont bientôt conduire à des révisions de l'organisation et de la physiologie de la ville, afin d'aller vers un modèle de ville durable. Dans cette mutation du mode de vie urbain, en une ou deux générations, aucune solution ne peut être négligée. C'est l'occasion de valoriser une ressource peu utilisée et très méconnue: le sous-sol et plus généralement l'espace souterrain. S'il peut contribuer à rendre la ville durable, il s'agit alors de réfléchir aux conditions et aux modalités urbanistiques qui permettront une meilleure prise en compte de cet espace par les concepteurs, aménageurs et gestionnaires de la ville."

MPACTS ET ENJEUX LIÉS AU CADRE DE VIE ET AUX ACTIVITÉS

12.2.1 En phase chantier

L'impact le plus immédiatement visible est la dégradation du cadre de vie des communes concernées, à la fois aux abords immédiats du chantier, mais également le long des voiries indirectement touchées du fait des reports de trafic.

La phase chantier pose également le problème de l'occupation temporaire de terrains et de la modification des accès piétons et routiers : certaines voies sont coupées, d'autres se voient affecter temporairement de nouvelles fonctions ou de nouveaux sens de circulation. Ces modifications du plan de circulation ont des conséquences sur le cadre de vie, mais elles ont également un impact sur l'économie, notamment en milieu urbain avec :

- des problèmes d'accès aux habitations et aux places de stationnement pour les riverains,
- la perturbation des activités économiques des zones dont l'accès est rendu plus difficile, ou pose des problèmes de sécurité (pour la circulation piétonne par exemple).

Un autre aspect concerne le fonctionnement des réseaux, dont des interruptions ou des déplacements sont à prévoir, avec comme conséquence pour les usagers des coupures d'électricité ou de gaz par exemple.

Enfin, certains impacts communs à tout chantier routier peuvent prendre plus d'ampleur du fait des spécificités des travaux de percement d'un tunnel, comme par exemple :

- l'utilisation de terrains pour le stockage de matériaux,
- les problèmes liés à l'irrigation : drainage excessif ou au contraire hydromorphie.

Pour l'ensemble de ces impacts, le problème sera très différent s'il s'agit soit d'une tranchée couverte (lourde d'incidences), soit d'un tunnel creusé (impacts réduits).

12.2.2 En phase exploitation

En phase exploitation, toutes les parties enterrées sont *a priori* sans impact sur la surface sauf à considérer :

- les impacts spécifiques évoqués dans les chapitres thématiques précédents,
- les impacts positifs en lien avec la surface libérée, avec comme enjeu l'amélioration du cadre de vie :
 - > limitation du trafic en surface,
 - > suppression d'effets de coupure entre quartiers,
 - > modes de déplacement doux favorisés,
 - > amélioration de la sécurité des piétons et des cyclistes,
 - > liens sociaux favorisés par la création de nouveaux espaces publics et / ou collectifs (jardins publics, etc.).

Les parties du tunnel en relation avec l'extérieur, qu'il s'agisse des têtes ou stations de ventilation, peuvent en revanche affecter le cadre de vie. Dans le cas d'une tranchée couverte, les contraintes de tenue au feu peuvent aussi limiter les aménagements en surface au-dessus de la tranchée.

Par ailleurs, un tunnel peut être à l'origine d'impacts négatifs indirects plus difficiles à évaluer. Ils concernent la dégradation du cadre de vie à proximité des voiries qui peuvent subir une forte augmentation de leur trafic, notamment en milieu urbain où le tunnel peut avoir un effet attractif important sur le trafic interne à l'agglomération. Enfin, en milieu rural, le risque de drainage de nappes peut avoir pour conséquence l'assèchement de terres cultivées, plantées ou pâturées, perturbant ainsi l'activité économique. Les réorganisations foncières éventuelles, sans être spécifiques au tunnel, constituent aussi un impact indirect qui peut perturber les activités et le cadre de vie.

DÉMARCHE D'ÉTUDE

La démarche d'étude complète est synthétisée dans le *tableau 32*. Elle distingue les actions spécifiques qui sont

à mener en milieu rural où sylviculture et agriculture peuvent constituer une part essentielle de l'activité.

Étape	Actions à mener pour le thème "cadre de vie et activités humaines"	Actions spécifiques à mener en milieu rural
Études d'opportunité	 caractériser les pôles principaux d'urbanisation, les principaux réseaux de communication mettre en évidence les enjeux 	 caractériser l'occupation agricole : superficie, types de culture, localisation des périmètres d'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) et exploitations biologiques caractériser l'occupation forestière : superficie, type de forêt (essences et vocation), propriétaires (collectivité, privé, etc.) et espaces protégés
Études préalables à l'enquête publique : comparaison des variantes	évaluer la sensibilité des enjeux selon les caractéristiques des différentes variantes du projet comparer les variantes au regard des impacts potentiels tels que : la suppression de bâtiments les coupures de réseau de communication la déstructuration du tissu urbain le potentiel de mise en valeur des espaces libérés	compléter et affiner les éléments recueillis lors de la phase précédente comparer les variantes du projet sur la base de l'évaluation de leurs impacts sur l'agriculture et la sylviculture : consommation de l'espace risques de déstructuration des exploitations ou des unités fonctionnelles nécessité ou non de réaménagement foncier. Il est impératif d'associer les chambres d'agriculture à cette phase.
Études préalables à l'enquête publique : étude de la variante proposée	évaluer plus finement les impacts du projet et les mesures à prendre, étudier en détail les propositions d'aménagement.	 évaluer plus finement les impacts du projet et les mesures à prendre, entamer les procédures de réaménagement foncier (aménagement agricole et forestier) si nécessaire.
Études de conception	étudier de façon détaillée les impacts de la phase chantier : • identifier les cheminements possibles pour l'évacuation des matériaux et le passage des engins, • localiser les zones de stockage et de stationnement, • identifier les itinéraires temporaires à mettre en place, • étudier un nouveau plan de circulation.	étudier de façon détaillée les rétablissements des réseaux (accès et irrigation), réaliser les éventuels réaménagements agricoles et fonciers.

Tableau 32 : vue d'ensemble du déroulement des études et prise en compte du cadre de vie et des activités (source : CETE de Lyon)

12.4 MÉTHODES ET MOYENS D'ÉVALUATION

A l'image de l'étude de bien d'autres thèmes, intégrer correctement le cadre de vie et les activités humaines dans un projet passe essentiellement par la réalisation d'un état initial le plus exhaustif possible.

L'état initial doit aboutir à la mise en évidence des principaux enjeux. Ce travail se fait notamment par l'étude des documents d'urbanisme et doit permettre de connaître dans la zone d'étude :

- les principes et les différents objectifs d'aménagement,
- la destination générale des sols: zones urbanisées ou à urbaniser, implantations actuelles et futures des Zones d'Aménagement Concerté (ZAC), zones naturelles et agricoles, vocation des terrains actuellement non bâtis, etc.
- les voies de communication selon leur nature, usage et fréquentation,
- les servitudes d'utilité publique.

En milieu rural, la mise en évidence des enjeux est à compléter par le recueil de données sur :

- le type de cultures : céréaliculture, arboriculture, viticulture, etc
- · les périmètres de protection AOC,
- les zones d'agriculture biologique,
- la localisation des principaux drains et réseaux collectifs pour l'agriculture,
- la nature, le classement et le type de propriété des espaces boisés pour la sylviculture.

A ce titre, des contacts doivent être pris avec les organismes impliqués dans ces domaines (DRAF, DOAF et chambres d'agricultures).

Ce travail fait l'objet d'un rendu cartographique représentant les enjeux hiérarchisés qui sont autant d'éléments importants en vue de la comparaison des partis d'aménagement. En effet, ces données, confrontées aux caractéristiques techniques des différentes variantes, doivent permettre de classer les variantes du projet en fonction des possibilités d'évitement et de réduction des contraintes, mais aussi des opportunités d'aménagement et de requalification.

Au stade de l'évaluation précise des impacts de la variante proposée, l'état initial est affiné et nécessite d'avoir une bonne connaissance du fonctionnement des quartiers qui seront concernés par les travaux, en particulier :

- les cheminements et les habitudes d'un quartier,
- l'origine de la clientèle des zones commerçantes,
- les zones à circonscrire particulièrement en phase chantier (écoles, établissements recevant du public, etc.).

En milieu rural, il sera nécessaire de connaître plus précisément les exploitations :

- structure foncière (taille et morcellement éventuel des parcelles),
- · chemins d'accès,
- · perspective d'évolution,
- orientation du développement rural local (activités en baisse, nouvelles activités, etc.)
- mode de gestion des espaces boisés, etc.

MESURES DE RÉDUCTION DES IMPACTS

En phase chantier un certain nombre de mesures permettent de réduire les impacts sur le cadre de vie :

- des restrictions concernant le déroulement des travaux telles que des horaires définis pour les travaux susceptibles de gêner les riverains,
- la recherche d'itinéraires de chantier les moins pénalisants pour les riverains, voire la création de pistes spécifiques,
- la mise en place de dessertes provisoires pour les riverains,
- la remise en état rapide des terrains et des sols en fin de chantier ainsi que des réseaux et voies de communication.

Les incidences sur les activités économiques peuvent quant à elles être réduites par un phasage judicieux des travaux.

Pour la phase d'exploitation, les réaménagements urbains ont déjà été évoqués à plusieurs reprises dans ce document. En milieu rural, les réaménagements du foncier agricole nourrissent des objectifs similaires et permettent de mettre en place des mesures de compensation. Des indemnités complémentaires peuvent également être versées. S'agissant de la sylviculture, les mesures classiques de réduction et de compensation peuvent être prévues :

- · remembrement des surfaces forestières,
- · acquisitions foncières hors forêt,
- constitution de nouveaux boisements,

- échanges de parcelles forestières entre communes, éventuellement complétés par des indemnités,
- rétablissement des voies de dessertes.

DISPOSITIONS RÉGLEMENTAIRES

Les textes législatifs sur ces thématiques sont codifiés dans :

- le Code de l'urbanisme et notamment les articles :
 - > L 123-16 et R 123-23 (mise en compatibilité des plans locaux d'urbanisme),
 - > L122-15 et R122-11 (mise en compatibilité des SCOT),
- le Code rural et notamment les articles :
 - > L.112-2 et L.112-3.
 - > L.123-24 à L.123-26,
 - > L.352-1 et R.123-30,
 - > L511-3 et R511-66 relatifs à la consultation de la chambre d'agriculture,
 - > *L642-11* relatif à la consultation de l'institut national de l'origine et de la qualité.

Ces textes indiquent la façon dont doivent être pris en compte les impacts sur l'agriculture liés à la réalisation du projet (coupure de parcelles et des accès, réduction de la surface agricole, modification de l'organisation des exploitations, etc.).

Ils indiquent également les mesures à envisager, notamment par l'aménagement foncier de la commune ou de la partie du territoire communal concerné par les travaux. L'aménagement foncier doit être décidé par la CAF (Commission d'Aménagement Foncier).

Enfin, pour tout ce qui relève des forêts et de la sylviculture, la réglementation relève du *Code Forestier* et notamment des articles *R221-37* et *R221-38* relatifs à la consultation du centre régional de la propriété forestière.

12.7 QUELQUES RÉFÉRENCES UTILES

- [62] Les études d'environnement dans les projets routiers
 Projets routiers interurbains (Guide méthodologique, 308 p.) / SETRA / octobre 1997.
- [63] Les études d'environnement dans les projets routiers -Projets routiers urbains (Guide méthodologique, 191 p.)/ CERTU / janvier 1998.

NOTES

CE GUIDE A ÉTÉ RÉDIGÉ AU SEIN DE PLUSIEURS GROUPES DE TRAVAIL DONT LES MEMBRES SONT INDIQUÉS CI-DESSOUS.

CETU - 25, avenue F. Mitterrand - case n°1 69674 BRON cedex

Cyrille BERNAGAUD, Laetitia D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER, Patrick BOUGUET, Jean-François BURKHART, Laurène FAURIA, Cédric GAILLARD, Gilles HAMAIDE, Michel JANIN, Daniel LAMARCHE, Thierry PANIGONI, Fabien RIVAL, Didier SUBRIN, Serge ZAPPELLI

CETE de Lyon – 25, avenue F. Mitterrand - case n°1 69674 BRON cedex

Olivier NOROTTE, Pascale FIEVET, Guy BOBILLON, Jérôme CROSNIER, Laurent EISENLOHR, Jean-Jacques LEBLOND, Yann MEYER, Xavier OLNY



Centre d'Études des Tunnels

25 avenue François Mitterrand Case n°1

69674 BRON - FRANCE Tél. 33 (0)4 72 14 34 00 Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

