



MASTERE SPECIALISE : **TUNNELS ET OUVRAGES** **SOUTERRAINS**

de la conception à l'exploitation

PROGRAMME DES ENSEIGNEMENTS

(VERSION MARS 2020)

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

MODULE 1 : CONNAISSANCES DE BASE

Volume horaire : 84 heures

Crédits ECTS : 6

Présentation générale

Ce module a pour vocation de mettre à niveau l'ensemble des étudiants sur les connaissances de bases de l'ingénieur indispensables dans le domaine des travaux souterrains : connaissance du milieu naturel (géologie et hydrogéologie pour l'ingénieur) et du comportement des sols et des roches, comportement des matériaux et des structures, modélisation numérique par éléments finis, introduction à la justification du soutènement en tunnel.

Le profil de formation antérieur des étudiants suppose que ces notions aient déjà été étudiées en partie au moins dans le cursus de formation initiale. Pour les étudiants qui, au niveau de leur formation initiale, auraient des lacunes dans certains de ces domaines, il sera demandé un travail de formation initial personnel à réaliser avant le début du mastère, suivant des modalités personnalisées.

Composition de l'équipe

- **Responsable pédagogique** : Denis Branque (ENTPE), email : denis.branque@entpe.fr
- **Correspondant interne** : Denis Branque (ENTPE), email : denis.branque@entpe.fr
- **Formateurs**: Nicolas Berthoz (CETU), Denis Branque (ENTPE), Fabien Delhomme (INSA Lyon), Fabrice Emeriault (Grenoble INP), Johan Kasperski (CETU), Didier Subrin (CETU), Henry Wong (ENTPE), Cédric Gaillard (CETU)

Objectifs pédagogiques proposés

A l'issue de la formation les stagiaires seront en mesure de:

- Comprendre les concepts fondamentaux de la géologie pour l'ingénieur en travaux souterrains
- Maitriser les éléments fondamentaux du comportement des sols et des roches
- Maitriser les connaissances sur les matériaux en vue du dimensionnement des soutènements
- Savoir mettre en œuvre un code de calcul de type éléments finis en Géotechnique

Pré Requis

Ce module s'adresse à des étudiants disposant de connaissances de niveau ingénieur dans les domaines de la géologie et/ou de la géotechnique et/ou du génie civil et/ou des géosciences.

Pour les étudiants qui, au niveau de leur formation initiale, auraient des lacunes dans l'un des domaines enseignés dans ce module, il sera demandé un travail de remise à niveau personnel à réaliser avant le début du mastère, suivant des modalités personnalisées à définir avec les responsables pédagogiques du Mastère.

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS
de la conception à l'exploitation

Organisation des enseignements du module 1

Programme détaillé des enseignements	Durée	Intervenants
<p>1.1 Rappels de Mécanique des Milieux continus</p> <p>1.1.1 Hypothèses de la MMC 1.1.2 Cinématique des milieux continus 1.1.3 Déformations dans les milieux continus 1.1.4 Contraintes dans les milieux continus 1.1.5 Modèle rhéologiques pour les milieux continus solides</p>	8h	Denis Branque (ENTPE)
<p>1.2 Rappels de Résistance des Matériaux</p> <p>1.2.1 Rappel sur les liaisons cinématiques et leur torseur d'efforts associé / principe fondamental de la statique 1.2.2 Hypothèses de la théorie des poutres 1.2.3 Torseur d'efforts intérieurs 1.2.4 Lien torseur d'efforts internes / champ de contrainte dans une section 1.2.5 Théorèmes énergétiques / applications pour la résolution de problèmes hyperstatiques</p>	6h	Florent Prunier (INSA)
<p>1.3 Base de Géologie pour l'Ingénieur</p> <p>1.3.1 Familles de roches, description lithologique. 1.3.2 Discontinuités des massifs rocheux : typologie (failles, diaclases, stratification, ...), description et représentations stéréographique. 1.3.3 Hydrogéologie : stockage, écoulement, types de perméabilité, cas particulier des Karsts. 1.3.4 Contextes géologiques problématiques 1.3.5 Visite de sites géologiques</p>	12h + visite	Johan Kasperski (CETU) Cédric Gaillard (CETU)
<p>1.4 Comportement mécanique des sols</p> <p>1.4.1 Identification physique des sols 1.4.2 L'eau dans les sols 1.4.3 Compressibilité- consolidation 1.4.4 Résistance au cisaillement (drainé, non drainé, non saturé, dilatance, contractance, liquéfaction, ... 1.4.5 Comportement des sols améliorés par traitements 1.4.6 Les essais de sols en laboratoire et in situ</p>	12h	Henry Wong (ENTPE)
<p>1.5 Comportement mécanique des roches</p> <p>1.5.1 Identification et propriétés physiques de la matrice rocheuse 1.5.2 Caractérisation du comportement des roches en laboratoire 1.5.3 Déformabilité, rupture et anisotropie des roches 1.5.4 Structures et comportement mécanique des discontinuités 1.5.5 Représentation stéréographique et stabilité en milieu discontinu 1.5.6 Etats de contraintes dans les massifs rocheux</p>	12h	Didier Subrin (CETU)

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS
de la conception à l'exploitation

<p>1.6 Matériaux et structures</p> <p>1.6.1 Bases de mécanique des structures 1.6.2 Comportement des bétons armés et non armés, des bétons projetés et fibrés 1.6.3 Comportement des coulis et mortier, des boulons (métalliques et fibre de verre) 1.6.4 Comportement des structures métalliques (cintres...) 1.6.5 Tenue au feu 1.6.6 Vieillessement des matériaux de construction (acier, maçonnerie, ...) : corrosion, dissolution, fluage</p>	15h	Fabien Delhomme (INSA de Lyon)
<p>1.7 Introduction à la modélisation numérique</p> <p>1.7.1 Lois de comportement avancées (élastique linéaire Mohr-Coulomb, Cam Clay, Hardening soil) 1.7.2 Principe des méthodes numériques (Eléments Finis, Eléments distincts) 1.7.3 Prise en main d'un logiciel EF 1.7.4 Choix d'une loi de comportement, conception du maillage (extension, taille, type d'éléments), Conditions limites et conditions initiale, Phasage de calcul... 1.7.5 Mini projet : Application des notions de base enseignées dans un projet de modélisation d'une structure enterrées simple à l'aide de la méthode des éléments finis.</p>	12h	Fabrice Emeriault (Grenoble INP)
<p>1.8 Introduction à la justification des soutènements en tunnel</p> <p>1.8.1 Etats limites et méthodes associées 1.8.2 Méthode convergence - confinement</p>	3h	Nicolas Berthoz (CETU)
Examen de validation (épreuve écrite)	4h	

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

MODULE 2 : APPROCHE GÉNÉRALE DU PROJET

Volume horaire : 57 h

Crédits ECTS : 6

Présentation générale

Ce module présente les spécificités des projets d'ouvrages souterrains et en particulier l'approche du projet par la démarche de management des risques.

En première partie, après une présentation des enjeux des ouvrages souterrains, sont abordés les principaux acteurs et leurs rôles, la nature des contrats qui les lient et le référentiel général des projets de tunnels.

Dans une deuxième partie, l'enseignement porte sur la conception des ouvrages. Sont abordés successivement la définition du programme, l'insertion environnementale et les réponses techniques possibles, dans une approche progressive selon les étapes successives prévues par la réglementation française. L'objectif est d'expliquer comment prendre en compte la multiplicité et la complexité des thèmes à traiter et comment mener le processus d'étude pour apporter aux décideurs les éléments nécessaires à la décision. La formation insiste sur le management des risques techniques au service de la conduite de projet. L'approche économique est également abordée.

La troisième partie traite de la contractualisation des travaux et de leur exécution. Les contrats de travaux en souterrain son régit par le fascicule 69 du CCTG qui prévoit la contractualisation du mémoire de synthèse géotechnique et du plan de management des risques. La formation traite largement de cette spécificité des ouvrages souterrains, notamment grâce aux cas d'application et aux retours d'expériences

Composition de l'équipe

- **Responsable pédagogique** : Gilles Hamaide (CETU),
- **Correspondant interne** : Florent PRUNIER (INSA de Lyon), e-mail : florent.prunier@insa-lyon.fr
- **Formateurs** : Catherine CABUT (CETU), Laetitia D'ALOÏA (CETU), Frédéric BULTEL (EGIS), Sabrina FANTIN (VINCI) Gilles HAMAIDE (CETU), Maud MACARY (CETU), François MARTIN (BG), Florent ROBERT (CETU), Johan KASPERSKI (CETU), Michel PRE (SETEC), Hubert TOURNERY (EGIS), Aziz DIAITE (EIFFAGE)
- **Autres (conférenciers...)**: Monique LABBE (Architecte), D. COUFFIGNAL (Cabinet Clément), Michel ROIGNOT (SYTRAL)

Objectifs pédagogiques proposés

A l'issue de la formation les stagiaires seront en mesure de:

- Identifier les acteurs et les enjeux essentiels de l'étude d'un projet d'ouvrage souterrain et notamment connaître la notion de programme de l'ouvrage,
- Planifier les étapes d'études procédant à la conception et l'optimisation d'un projet et à sa réalisation,
- Maitriser le pilotage des reconnaissances et des études spécifiques nécessaires à la connaissance du contexte géotechnique et des avoisinants, notamment par le management des risques,
- Définir précisément les ouvrages répondant aux fonctionnalités, contraintes et exigences figurant

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

au programme de l'ouvrage,

- Déterminer les méthodes et moyens à mettre en œuvre pour construire l'ouvrage ou l'infrastructure envisagés et en apprécier les effets sur l'environnement,
- Concevoir des ouvrages en prenant en compte les exigences du développement durable tant en phase de travaux qu'en phase d'exploitation,
- Identifier les choix contractuels les plus adaptés avec leurs avantages et inconvénients et connaître leur mise en œuvre
- Assurer le suivi technique et économique des travaux de construction

Pré Requis

Avant d'aborder le module les stagiaires doivent maîtriser les connaissances de niveau ingénieur en matière de génie civil.

Organisation des enseignements du module 2

Programme détaillé du cours	Durée	Intervenants
2.1 Spécificités des travaux souterrains 2.1.1. Conférence introductive 2.1.2. Enjeux et risques propres aux travaux souterrains	2h 2h	Michel PRE Hubert TOURNERY
2.2 Le cadre général et les acteurs	4h	Catherine CABUT
2.3 Conception des ouvrages souterrains 2.3.1. Le programme de l'ouvrage (données, contraintes, objectifs, exigences) 2.3.2. La réponse technique au programme et les étapes d'une étude 2.3.3. Appréciation et traitement des risques géologiques à la conception 2.3.4. Les missions géotechniques appliquées aux ouvrages souterrains, méthode observationnelle 2.3.5. Approche économique (coûts et délais) et BIM (concept) 2.3.6. Développement durable, méthode ACV	2h 4h 3h 2h 4h 3h	Michel PRE Michel PRE Johan KASPERSKI François MARTIN Florent ROBERT Laetitia D'ALOÏA
2.4. Contractualisation et réalisation 2.4.1. Introduction au management des risques en construction 2.4.2. Fascicule 69 et recommandations pour la contractualisation des travaux en souterrain 2.4.3. Le dossier de consultation des entreprises, la préparation du marché, le PMR, cas d'application 2.4.4. Déroulement des travaux, réalisation des missions G3 et G4, point de vue de l'entreprise 2.4.5. Impact des chantiers sur l'environnement et les avoisinants	2h 4h 3h 4h 2h	Hubert TOURNERY Maud MACARY Frédéric BULTEL François MARTIN, Sabrina FANTIN Frédéric BULTEL

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS
de la conception à l'exploitation

2.5. Études de cas 2.5.1 Un projet ferroviaire 2.5.2 Un projet routier 2.5.3 Un projet de réhabilitation	6h	Michel PRE Gilles HAMAIDE Hubert TOURNERY
2.6. Les conférences spéciales 2.6.1 Une opération urbaine présentée par le Maître d'Ouvrage 2.6.2 Les contrats dans la réglementation française 2.6.3 Utilisation de l'espace souterrain	2h 2h 2h	Armelle GAUTIER Daniel COUFFIGNAL Monique LABBE
Examen de validation	4h	Gilles Hamaide

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

MODULE 3 : TECHNIQUES DE CONSTRUCTION

Durée : 65h de cours et 18h de conférences spécialisées

Crédits ECTS : 7

Présentation générale

L'objectif du module 3 est de donner aux étudiants les connaissances de base concernant les principales techniques de construction en matière d'ouvrages souterrains (tunnels, stations, puits, ouvrages annexes).

Une présentation aussi large que possible des techniques actuelles sera proposée en abordant d'une part les principes des différentes méthodes et leurs domaines d'application, d'autre part en traitant les questions liées à l'organisation des chantiers, aux moyens en personnel et matériels, aux cycles de production et aux programmes associés.

Une part importante du temps d'enseignement sera également consacrée à présenter les limites de ces différentes méthodes de construction ainsi que les risques associés, avec au besoin des références à des incidents ou accidents connus. Le retour d'expérience sera en particulier présenté pour exposer la maîtrise des risques évoqués. Une attention particulière sera également apportée aux questions de sécurité et de limitation de l'impact environnemental.

Au cours du projet de « Mise en situation professionnelle » (module 7), les étudiants auront à proposer et justifier des solutions dans le cadre de problèmes pratiques concrets (choix d'une technique de construction, planning et coût associés, ...) en appuyant leur raisonnement sur les connaissances acquises dans le cadre des enseignements du module 3.

Composition de l'équipe

- **Responsable pédagogique:** Alain Mercusot (AFTES)
- **Correspondant interne :** Denis Branque (ENTPE), email : denis.branque@entpe.fr
- **Formateurs:** Laurent Aubert (Soletanche), Elisa Beraud (Eiffage) Cyril Chaubert (Solétanche), Bernard Claverie (CSM Bessac), Bruno Combe (Bouygues), Dino De Lorenzi (Implemia), Hassan Farhat (Arcadis), Cédric Gaillard (CETU), Pascal Guédon (Arcadis), Pierre Ingant (EGIS), Basile Leconte (Solétanche), Jean Claude Le Péchon (AFTES), Jean Louis Mahuet (EGIS), Alain Mercusot (AFTES), Thierry Panigoni (CETU), François Renault (VINCI), Bernard Théron (CSM Bessac), Loïc Thévenot (Eiffage TP), M. Thone (AFTES),
- **Conférenciers :** D. Aubertin (EPC France), Chris Norris (CGE), Ronald Heijmans (Arcadis NL), Pascal Sergi (CARSATT), Guy Lechantre (HK),...

Objectifs pédagogiques proposés

A l'issue de la formation les stagiaires seront en mesure de:

- o Connaître les principales techniques de construction en matière de tunnels et d'ouvrages souterrains,
- o Approcher les principaux risques et aléas inhérents à ces techniques de construction et les façons de les maîtriser,
- o Appréhender les méthodes et critères permettant de choisir et d'adapter les techniques aux différents types de terrains rencontrés.

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

<p>3.4 Creusement au tunnelier en terrain meuble</p> <p>3.4.1 Généralités sur les tunneliers (historique, types de machines, terminologies, domaines d'utilisation)</p> <p>3.4.2 Les fonctions d'un tunnelier (abattage, marinage, soutènement, progression et guidage, pose du revêtement)</p> <p>3.4.3 Les grandes classes de machine et la logistique associée (pression de terre, pression de boue, pression d'air)</p> <p>3.4.4 Les critères de choix du mode de pressurisation (nature du terrain, choix et maintenance des outils d'abattage, caractéristiques et rôles de la boue et des additifs de forage)</p> <p>3.4.5 Traitement des déblais</p> <p>3.4.6 Conduite du tunnelier et contrôle</p> <p>3.4.7 Entrées et sorties de terre</p> <p>3.4.8 Les voussoirs préfabriqués (fabrication, transport, mise en place, étanchéité entre voussoirs, injection de bourrage)</p> <p>3.4.9 Risques associés (incidents et accidents types, maîtrise des risques)</p>	6h	<p>Bruno Combe (Bouygues)</p> <p>Emanuele Marcucci (Bouygues)</p>
<p>3.5 Tunneliers en terrain meuble : cas particulier des tunneliers à pression de boue</p> <p>3.5.1 Un peu d'histoire</p> <p>3.5.2 Rôle de la boue</p> <p>3.5.3 Principes de caractérisation d'une boue de forage</p> <p>3.5.4 Détermination de la pression frontale</p> <p>3.5.5 Principes de fonctionnement des tunneliers à pression de boue</p> <p>3.5.6 Domaines d'utilisation et limites de la méthode</p> <p>3.5.7 Principes de fonctionnement de la centrale de séparation</p>	3h	<p>François Renault (Vinci)</p>
<p>3.6 Interventions en condition hyperbare</p> <p>3.6.1 Histoire et problématique</p> <p>3.6.2 Evaluation des risques et principe de sécurité</p> <p>3.6.3 Cas particuliers des hautes pressions</p> <p>3.6.4 Conséquences réglementaires</p>	3h	<p>Jean Claude Le Péchon (Hyperbar)</p>
<p>3.7 Creusement au tunnelier au rocher</p> <p>3.7.1 Généralités sur les tunneliers au rocher</p> <p>3.7.2 Les différents types de tunnelier (tunnelier à attaque ponctuelle ou pleine face, avec ou sans bouclier,)</p> <p>3.7.3 La roue de coupe et les molettes (principe, usure, changement, maintenance)</p> <p>3.7.4 Avancement du TBM et guidage (vérins, grippers, contrôle)</p> <p>3.7.5 Le marinage</p> <p>3.7.6 Mise en œuvre du soutènement (boulons, cintres et/ou béton projeté, voussoirs)</p> <p>3.7.8 Drainage et le pompage des arrivées d'eau à front</p> <p>3.7.9 Incidents et accidents types / Maîtrise des risques</p>	6h	<p>Bernard De Lorenzi (Implenia)</p>

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS
de la conception à l'exploitation

<p>3.8 Conférence spécialisée Fabricant de tunnelier</p>	2h	Guy Lechantre (HERRENKNECHT)
<p>3.9 Etanchéité et drainage</p> <p>3.9.1 Enjeux de l'étanchéité des ouvrages souterrains</p> <p>3.9.2 Evolution et réglementations</p> <p>3.9.3 Critères de choix</p> <p>3.9.4 Procédés d'étanchement (tunnels creusés ou forés, ouvrages associés, tranchées couvertes)</p> <p>3.9.5 Produits et techniques de réalisation (préparation du support, traitement des arrêts d'eau, techniques et produits d'étanchéité, contrôles spécifiques)</p>	3h	Jean Louis Mahuet (EGIS)
<p>3.10 Revêtement</p> <p>3.10.1 Structures coffrées</p> <p>3.10.2 Revêtements armés et non-armés</p> <p>3.10.3 Outils coffrants (les différents types de coffrages, Mise en œuvre sur chantier, exemples de réalisation)</p> <p>3.10.4 Bétons (composition, utilisation, aspects, fabrication, exemples)</p> <p>3.10.5 Bétonnage (cycles et exemples, contraintes et qualité, matériels, vibration du béton, durcissement et maturométrie, décintrement et cure, Cycle de fabrication et bétonnage)</p> <p>3.10.6 Calculs des outils (contenu de la note type, mesures de bétonnage, règles de calcul du bétonnage)</p> <p>3.10.7 Défauts de réalisation</p> <p>3.10.8 Prix (outils coffrants, bétons et aciers)</p>	3h	Alain Mercusot (CETU) Pierre Hingant (EGIS)
<p>3.11 Conférence spécialisée sur les tunnels immergés</p> <p>3.11.1 Principe et exemples de réalisations</p> <p>3.11.2 Préfabrication des caissons</p> <p>3.11.3 Implantation, préparation d'appui, mise à l'eau, flottaison et immersion des caissons</p> <p>3.11.4 Liaison entre éléments préfabriqués et techniques des joints d'étanchéité</p> <p>3.11.5 Raccordement des têtes</p>	3h	Ronald HEIJMANS (ARCADIS – NL)
<p>3.12 Micro-tunnels</p> <p>3.12.1 Définitions, domaine d'emploi et principe de fonctionnement</p> <p>3.12.2 Différents types de matériel existant sur le marché</p> <p>3.12.3 Les différentes composantes du système (matériel de fonçage, stations de poussage et de reprise, puits)</p> <p>3.12.4 Excavation, Guidage, Lubrification, Revêtement</p> <p>3.12.5 Contrôles et Prix</p> <p>3.12.6 Exemples de réalisation</p>	4h	Bernard Théron (CSM Bessac) Raphaël Claverie (CSM Bessac)

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS
de la conception à l'exploitation

<p>3.13 Confortement des terrains – techniques particulières d'entrée en tunnel</p> <p>3.13.1 Généralités 3.13.2 Berlinoises, jet-grouting, clouage de parois... 3.13.3 Techniques d'injection de sol 3.13.4 Techniques de congélation de sol 3.13.5 Techniques de rabattement de nappes</p>	4h	Hassan Farhat (Arcadis)
<p>3.14 Confortement des terrains – Voûtes parapluie</p> <p>3.14.1 Généralités et illustrations au travers de la présentation de SBT 3.14.2 Notion de pré-soutènement 3.14.3 Principes de la voûte parapluie 3.14.4 Différents modes de réalisation 3.14.5 Aspects calculatoires 3.14.6 Exemple du tunnel de Toulon</p>	3h	Cyril Chaubert (Solétanche Bachy Tunnels)
<p>3.15 Confortement des terrains – Injections de compensation</p> <p>3.15.1 Principes 3.15.2 Les outils / Prédiction des mouvements 3.15.3 Les outils / Surveillance et Contrôle des injections 3.15.4 Application : Tunnel de Toulon – 2ème tube</p>	2h	Basile Leconte (Solétanche Bachy)
<p>3.16 Confortement des terrains – Congélation des sols</p> <p>3.16.1 Historique et principes généraux 3.16.2 Les différents types de circuits 3.16.3 Les circuits de distribution des produits 3.16.4 Contrôles et essais en laboratoire 3.16.5 Dimensionnement d'une congélation 3.16.6 Exemples</p>	2h	Basile Leconte (Solétanche Bachy)
<p>3.17 Parois moulées et rideaux de soutènement</p> <p>3.17.1 Domaines d'utilisation 3.17.2 Principes de fonctionnement 3.17.3 Parois berlinoises et parisiennes 3.17.4 Parois moulées, parois préfabriquées, PAC 3.17.5 Appuis : tirants et butons 3.17.6 Palplanches 3.17.7 Parois clouées 3.17.8 Autres techniques : Soil mixing : Géomix et Trenchmix, Jet Grouting</p>	3h	L. Aubert (Solétanche Bachy)

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

<p>3.18 Ouvrages annexes et divers</p> <p>3.18.1 Les espaces souterrains (caves minées gares et stations de métro, les tranchées couvertes, les parkings de stationnement souterrains)</p> <p>3.18.2 Ouvrages annexes (fonctions, typologie, critères et contraintes de conception, soutènements envisageables, stabilité du fond de fouille, terrains gonflants, incidences du tunnelier, rameaux de communication avec le tunnel)</p> <p>3.18.3 Puits et galeries inclinées courants et profonds</p> <p>3.18.4 Puits courants et profonds verticaux en fonçage et sur alésage</p> <p>3.18.5 Puits et galeries profonds inclinés creusés en descendant</p> <p>3.18.6 Puits profonds verticaux ou inclinés creusés en remontant (Raise-boring, procédé ALIMAK, procédé BORPAK)</p> <p>3.18.7 Puits inclinés au tunnelier</p>	7h	<p>P. Guédon (Arcadis)</p> <p>M Thone (AFTES)</p>
<p>3.19 Ventilation de l'ouvrage souterrain en phase chantier</p> <p>3.19.1 Règles générales de prévention et principes de sécurité et de santé</p> <p>3.19.2 Polluants : gaz, poussières</p> <p>3.19.3 Principes de ventilation de base et modes de ventilation</p> <p>3.19.4 Détermination des débits d'air : projet et chantier</p> <p>3.19.5 Matériels de ventilation</p> <p>3.19.6 Exemples de calculs et exemples d'installations</p> <p>3.19.7 Rôle du chargé de ventilation</p> <p>3.19.8 Les contrôles</p>	2h	<p>Chris Norris (CGE)</p> <p>Elisa Beraud (Eiffage)</p>
<p>3.20 Etudes de prix</p> <p>3.20.1 Différents types de marchés.</p> <p>3.20.2 Qu'est-ce qu'une étude de prix ?</p> <p>3.20.3 Les différentes phases (chiffrage – Étude de prix., la vente et les étapes suivantes)</p> <p>3.20.4 Quelques ordres de grandeurs et exemples d'application</p> <p>3.20.5 Conclusion et questions diverses.</p>	2h	<p>Brice Philippe (Implénia)</p>
<p>3.21 Conférence spéciale : Sécurité</p> <p>3.21.1 Les acteurs de la prévention</p> <p>3.21.2 Les statistiques accident travail et maladies professionnelles</p> <p>3.21.3 Les risques et mesures de prévention lors de travaux souterrains</p>	2h	<p>Pascal Sergi (CARSAT)</p>
<p>Visites de chantiers et d'usines</p>	> 70h	<p>Denis Branque (ENTPE)</p>
<p>Examen de validation</p> <p>Choix d'une méthode de réalisation d'un ouvrage souterrain en fonction des données techniques du projet (géométrie, géologie, environnement...)</p>	4h	<p>Alain Mercusot (AFTES),</p>

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

MODULE 4 : CONCEPTION ET JUSTIFICATION

Durée : 73 h de cours

Crédits ECTS : 6,5

Présentation générale

Le module a pour objectifs de donner aux étudiants les principes et démarches de conception ainsi que les méthodes et outils de justification des tunnels.

Les éléments théoriques enseignés seront appliqués dans le cadre du module sur différentes études de cas ainsi que lors du Projet (Module 7).

Les étudiants pourront ainsi développer des compétences en conception et justification des tunnels et ouvrages annexes aussi bien en phase d'avant projet que de projet, en considérant les problématiques liées à la réalisation des travaux (stabilité provisoire, évaluation des impacts sur les avoisinants) ou tout au long de la vie de l'ouvrage (effets différés, stabilité au feu, ...).

Les enseignements dispensés seront principalement axés sur la définition du modèle géomécanique et ses implications sur la conception de l'ouvrage, sur la conception et justification du soutènement (au front et en arrière du front) et du revêtement. Certains points particuliers seront développés en fin de module : traitement des intersections, cas du creusement au tunnelier, interaction avec les avoisinants. Il sera fait autant que possible référence aux diverses recommandations de l'AFTES.

Les méthodes de calcul mises en œuvre vont des plus simples (méthodes analytiques utilisées dans le cadre d'étude d'avant-projet) aux plus sophistiquées (utilisées en phase projet pour l'analyse de points particuliers, telles que la méthode des éléments finis).

Composition de l'équipe

- **Responsable pédagogique:** Hervé Le Bissonnais (Terrasol)

- **Correspondant interne :** Florent Prunier (INSA de Lyon), E-mail : florent.prunier@insa-lyon.fr

- **Formateurs:** Hervé Le Bissonnais (Terrasol), Alexandre Beaussier (Terrasol), Benoit Bertrand (Egis), Olivier Gastebled (Vinci), Olivier Givet (Arcadis), Pascal Guedon (Arcadis), Jean Pierre Janin (Terrasol), François Laigle (EDF-CIH), Julian Marlinge (Terrasol), Sophie Minec (Bouygues TP), Didier Subrin (CETU), Reza Taerzadeh (Tractebel),.....

Objectifs pédagogiques proposés

A l'issue de la formation les stagiaires seront en mesure de :

- Concevoir une campagne de reconnaissance, d'en analyser les résultats et de rédiger une mémoire de synthèse géologique,
- Concevoir un projet de tunnel (profil en long, section, mode de réalisation, ...) à partir de ces éléments et des autres facteurs à prendre en compte et plus particulièrement de concevoir le soutènement et le revêtement,
- Définir le modèle géomécanique sur lequel se base les justifications,
- Justifier aux différentes étapes du projet avec les outils adaptés le soutènement (du front et en arrière du front) et le revêtement,
- Analyser la problématique de l'impact sur les avoisinants et celle des intersections.

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

Pré Requis

Avant d'aborder ce module, les stagiaires doivent avoir suivi le module 1 « Connaissances de base »

Organisation des enseignements du module

Programme détaillé du cours	Durée	Intervenants
<p>4.1. Caractérisation du massif et conception du soutènement</p> <p>4.1.0 Introduction générale : présentation du module, présentation de deux cas concrets de conception de tunnel, contexte général de la conception d'un tunnel.</p> <p>4.1.1 Caractérisation des massifs rocheux – recommandations du GT1 AFTES : définition du RMR, GSI et nombre Q de Barton ; exercices d'application sur détermination RMR et Q ; conception d'une campagne de reconnaissances géotechnique pour un tunnel, constitution du dossier géotechnique (GT32), modèle géomécanique.</p> <p>4.1.2 Principes de conception du soutènement et du revêtement : les différentes méthodes de calcul, les méthodes empiriques pour le predimensionnement des soutènements (AFTES, RMR, Q), exercice d'application, méthode semi empirique (Terzaghi).</p> <p>4.1.3 Méthode convergence- confinement (principes, détermination du taux de déconfinement)</p>	<p>5h</p> <p>6 h</p> <p>3 h</p> <p>3 h</p>	<p>) H. Le Bissonnais (Terrasol)</p> <p>A. Beaussier (Terrasol)</p> <p>H. Le Bissonnais (Terrasol)</p> <p>H. Le Bissonnais (Terrasol)</p>
<p>4.2. Justification du soutènement : front de taille, paroi de tunnel, tête de tunnel</p> <p>4.2.1 Justification du soutènement au front de taille : mécanismes de rupture, méthodes d'équilibre limite (Murayama, Anagnostou & Kovari, Piakowski), calcul à la rupture et analyse limite, renforcement et pré-soutènement.</p> <p>4.2.2 Creusement en méthode conventionnelle : soutènement en terrain meuble (cintres, béton projeté, boulonnage) ; utilisation des méthodes aux éléments finis (approche 2D et 3D), étude de cas (interaction entre ouvrages, rétro analyse).</p> <p>4.2.3 Soutènement en terrain rocheux (boulonnage)</p> <p>4.2.4 : Justification soutènement paroi et talus : cadre réglementaire, talus cloués, écrans de soutènement paroi moulée, talus cloués, étude de cas (gare du Grand Paris Express)</p>	<p>6 h</p> <p>6 h</p> <p>6 h</p> <p>3 h 3 h</p>	<p>D. Subrin (CETU)</p> <p>J.P Janin (Terrasol)</p> <p>F. Laigle (EDF)</p> <p>J. Marlinge (Terrasol) G. Chapron (Terrasol)</p>

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS
de la conception à l'exploitation

<p>4.3. Justification des tunnels creusés au tunnelier, tunnels creusés en site urbain, justification des revêtements</p> <p>4.3.1 Justification des revêtements des tunnels réalisés au tunnelier (voussoirs). 7h</p> <p>4.3.2 Justification des revêtements des tunnels réalisés en méthode conventionnelle (béton coulé). Calculs des sollicitations (Méthode éléments finis, méthodes aux réactions hyperstatiques) ; vérification des sections (béton non armé - recommandations AFTES/EC2 ; béton armé - EC2), exemple d'applications. 6 h</p> <p>4.3.3 Conception et justification des tunnels réalisés en site urbain - Interaction avec les avoisinants (maitrise des tassements, vibrations). 3 h</p> <p>4.3.4 : Modélisation numériques des tunnels creusés au tunnelier (approche 2D et 3D), calculs des tassements en surface et définition des pressions de confinement ; exercices d'application. 3 h</p>		<p>P. Guedon & O. Givet (Arcadis)</p> <p>B. Bertrand (Egis)</p> <p>O. Gastebled (Vinci)</p> <p>J. P. Janin (Terrasol)</p>
<p>4.4 Etudes de cas</p> <p>4.4.1 Tunnel de Toulon (deuxième tube) : conception et suivi des travaux 4 h</p> <p>4.4.2 Intersection de tunnel 2 h</p>		<p>J.P. Janin (Terrasol)</p> <p>S. Minec (Bouygues)</p>
<p>4.5 Conception des galeries hydrauliques</p> <p>4.5.1 Critères généraux de conception et dimensionnement,</p> <p>4.5.2 Choix du tracé et diamètre</p> <p>4.5.3 Types de revêtement,</p> <p>4.5.4 Dimensionnement des revêtements,</p> <p>4.5.5 Exercice d'application</p>	<p>4 h</p>	<p>Reza Taherzadeh (Tractebel)</p>
<p>Examen de validation (épreuve écrite)</p>	<p>3 h</p>	<p>H. Le Bissonnais (Terrasol)</p>

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

MODULE 5 : EQUIPEMENTS ET SECURITE EN PHASE D'EXPLOITATION

Durée : 29h de cours et 2h de conférences spécialisées

Crédits ECTS : 3

Présentation générale

Ce module a pour objectif d'apporter les éléments régissant les principes de sécurité d'exploitation des tunnels routiers et ferroviaires.

Il détaille les différents domaines assujettis à des prescriptions de sécurité , affectant les structures de génie Civil des tunnels, notamment les dispositifs de mise en sécurité des personnes et les modalités de résistance au feu des structures , et les équipements dans les domaines de la ventilation et désenfumage, l'alimentation électrique, la détection d'incendie , l'éclairage, et enfin les outils d'exploitation en situation perturbée .

Les conséquences de ces prescriptions sur le dimensionnement du génie Civil et sur les interfaces entre structures de génie Civil et équipements associés sont précisées.

Composition de l'équipe

- **Responsables pédagogiques:** Marc Tesson (CETU), Magali Schivre (INCAS Partners), Myriam Mili (SNCF Réseau),

- **Correspondant interne :** Denis Branque (ENTPE), email : denis.branque@entpe.fr

- **Formateurs:** Marc Tesson (CETU), Myriam Mili (SNCF Réseau), Jean-Claude Martin (CETU), Bérénice Moreau (CETU), Olivier Martinetto (Egis), Hervé Biollay (Egis), Matthieu Pihouee (Systra), Mickael Potier (CETU).

- **Autres (conférenciers...):** Xavier Yvenou (DGSCGC)

Objectifs pédagogiques proposés

A l'issue de la formation les stagiaires seront en mesure de:

- Connaître les conséquences de ces prescriptions sur le dimensionnement du Génie Civil et sur la conception globale d'un projet souterrain en tant que système associant équipements et structures de Génie Civil.
- Connaître les interfaces entre structures de génie Civil et équipements associés

Pré Requis

Ce module s'adresse à des étudiants disposant des connaissances de niveau ingénieur en matière de nature et dimensionnement des structures de Génie Civil.

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS
de la conception à l'exploitation

Organisation des enseignements du module

Programme détaillé du cours	Durée	Intervenant
<p>5.1 Les grands principes de la sécurité</p> <p>5.1.1 Dans les domaines du transport routier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les objectifs à satisfaire - Les conséquences en termes de stratégies de sécurité et d'intervention - Aperçu général des différentes réglementations et procédures - Les outils d'évaluation du niveau de sécurité <p>5.1.2 Dans les domaines du transport ferroviaire et guidés :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les objectifs à satisfaire - Les conséquences en termes de stratégies de sécurité et d'intervention - Aperçu général des différentes réglementations 	2h	Marc Tesson (CETU)
<p>5.2 Les principales dispositions d'exploitation et de sécurité pour les tunnels routiers</p> <p>5.2.1 Prise en compte des facteurs humains et organisationnels</p> <ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la connaissance sur les facteurs humains et organisationnels de la sécurité - Adaptation des dispositions techniques et organisationnelles <p>5.2.2 Exploitation et sécurité des tunnels routiers</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les dispositions de sécurité : les aménagements pour l'alerte, pour l'évacuation, l'accès des secours, les moyens d'intervention, la ventilation, les équipements (alimentation électrique, éclairage, moyens de détection et de lutte contre l'incendie, équipements de gestion du trafic, dispositifs de communication et d'alerte pour les services de secours et pour les usagers) - La ventilation sanitaire et de désenfumage - L'organisation et les moyens d'exploitation (les différents degrés de permanence et d'exploitation, les outils de l'exploitation, le maintien du niveau de sécurité) <p>5.2.3 Le comportement au feu (tunnels routiers, ferroviaires et de transports guidés)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Objectifs et niveau de résistance au feu - Le comportement des structures - Le fonctionnement des équipements 	2h	Marc Tesson (CETU)
	4h	Jean-Claude MARTIN (CETU)
	2h	Bérénice Moreau (CETU)

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS
de la conception à l'exploitation

<p>5.3 Les principales dispositions d'exploitation et de sécurité pour les tunnels ferroviaires</p> <p>5.3.1 L'impact de la sécurité sur la conception d'un ouvrage ferroviaire</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les différents besoins d'un tunnel ferroviaire - Principes généraux de sécurité - Règlementations et conséquences - Conception des ouvrages (section transversale) : gabarits (matériels, électriques), phénomènes aérodynamiques <p>5.3.2 Équipements de sécurité en tunnels et en gare</p> <ul style="list-style-type: none"> - Equipements de sécurité et d'exploitations : évacuation des voyageurs et des personnels, les principes d'auto-sauvetage, énergie électrique, notions d'alimentation électrique, ventilation et le désenfumage (principes de désenfumage, les équipements, les études et essais aérauliques), équipements de lutte contre l'incendie, postes de supervision, moyens d'intervention des services de secours - Gares Souterraines <p>5.3.3 Les principales dispositions d'exploitation et de sécurité pour les tunnels ferroviaires</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ventilation – désenfumage (principes de dimensionnement) 	<p>3h</p> <p>3h</p> <p>3h</p>	<p style="text-align: center;">Myriam Mili (SNCF Réseau) Matthieu Pihoué (SYSTRA)</p> <p style="text-align: center;">Myriam Mili (SNCF Réseau) Matthieu Pihoué (SYSTRA)</p> <p style="text-align: center;">Hervé Biollay (Egis Tunnels)</p>
<p>5.4 Les sujétions propres aux travaux liés aux Équipements</p> <p>5.4.1 Lors de la mise au point du projet détaillé</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'intégration des différents systèmes et de leurs modalités d'utilisation future dans la conception globale - Les interactions avec le génie civil - L'évaluation de chacun des systèmes et du système global – Notion d'analyse de risques <p>5.4.2 Lors de la phase de construction</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'articulation des chantiers Génie civil et Équipements - Le contrôle du fonctionnement, les essais, la réception et la mise en service 	<p>3h</p>	<p>Olivier MARTINETTO (EGIS)</p>
<p>5.5 Conférences spéciales</p> <p>Approche comparée de la sécurité dans les espaces souterrains</p>	<p>2h</p>	<p>Olivier Peronne (BSPP)</p>
<p>5.6 Etude de cas</p> <p>Mise aux normes règlementaires d'un tunnel routier ou Application des STI sur un projet de Ligne Nouvelle Ferroviaire</p>	<p>3 h</p>	<p>Marc Tesson (CETU) ou Myriam Mili (SNCF Réseau)</p>
<p>Examen de validation</p>	<p>2h</p>	<p>Marc Tesson (CETU) Myriam Mili (SNCF Réseau)</p>

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

MODULE 6 : GESTION DU PATRIMOINE DE TUNNEL

Durée : 20h de cours et 2h de conférences spécialisées

Crédits ECTS : 2,5

Présentation générale

Ce module a pour objectif de présenter les grands principes de gestion des tunnels, en détaillant les modalités d'inspection, de diagnostics de tunnels.

Les grands principes de construction des tunnels anciens sont présentés avec les pathologies associées à leurs structures et leurs méthodes d'exécution.

Les modes de surveillance et inspection sont détaillés, en liaison avec la réglementation en vigueur.

Les diverses méthodes de réparation sont abordées avec leurs interfaces avec les conditions d'exploitation.

Composition de l'équipe

- **Responsables pédagogiques:** Francesco CHILLE (SNCF Réseau DGII),

- **Correspondant interne :** Florent Prunier (INSA Lyon), E-mail : florent.prunier@insa-lyon

- **Formateurs:** Catherine LARIVE (CETU), Gilles DOUBLOT (SNCF Réseau DGII), Bastien SAGE-VALLIER, Antoine GUIMOND BARRETT (SNCF Réseau DGII), Christine THUAUD (SNCF Réseau DGII), Francesco CHILLE (SNCF Réseau DGII), Pierre POGGI (SNCF Réseau DGII),

- **Autres (conférenciers...):** Jean-Claude MARTIN (CETU)

Objectifs pédagogiques proposés

A l'issue de la formation les stagiaires seront en mesure de:

- Connaître les grands principes d'une gestion d'un patrimoine, avec l'anticipation et la planification nécessaires.
- Savoir analyser le comportement des ouvrages, en déduire les investissements de travaux associés éventuellement nécessaires, et les mesures préventives à mettre en place.

Pré Requis

Ce module s'adresse aux étudiants disposant de connaissance en matière de géologie et géotechnique adaptée aux projets de travaux souterrains.

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

6.3 Auscultation, instrumentation et investigations 6.3.1 Reconnaissance, auscultation et mesures <ul style="list-style-type: none"> - Investigations sous contraintes d'exploitation : - Investigation destructives : sondages, fouilles, fenêtres, essais in situ... - Investigations non destructives : mesures géophysiques, recon. visuelles... - Levés en lumière visible et infrarouge - Suivi instrumenté (nivellement, convergence, chargement, fissuration...) - Dispositif d'acquisition des données, alarmes, seuils... 	2 h	Antoine GUIMOND BARRETT (SNCF Réseau DGII)
6.4 Intervention durant la vie de l'ouvrage 6.4.1 Travaux de régénération <ul style="list-style-type: none"> - Purge et traitement des zones non revêtues - Injections de maçonnerie, d'extrados ou du terrain encaissant - Régénération et confortement par béton projeté et/ou ancrages 6.4.2 Traitement des venues d'eau <ul style="list-style-type: none"> - Captage, drainage, étanchement des venues d'eau sur ouvrages anciens - Injections d'arrêt d'eau et reprises d'étanchéité sur ouvrages récents 6.4.3 Intervention structurelle sur ouvrages en exploitation <ul style="list-style-type: none"> - Conditions particulières d'intervention au regard de l'exploitation - Etudes géométriques pour mise au gabarit des tunnels ferroviaires - Démolition partielle de la structure de revêtement et reconstruction, - Raidisseurs, voussoirs BP,-chemisage et coque indépendante - Réalésage d'ouvrages existants (tunnels de la RD926) - Travaux de radier en plateforme, assainissement, drainage - Modification de l'équilibre d'un tunnel induite par un projet tiers - Modélisation d'un tunnel ancien (recherche de son état d'équilibre). 6.4.4 Ventilation des chantiers ferroviaires <ul style="list-style-type: none"> - Chantiers ferroviaires - Règlementation et législation - Ventilation des chantiers - Modélisation 	1h 3h 3h 1h	Christine Thuaud (IG.SNCF) Francesco Chille (IG.SNCF) Catherine LARIVE (CETU) Chrisitne Thuaud (IG.SNCF) Francesco Chille (IG.SNCF) Pierre POGGI (SNCF Réseau DGII)
Conférences spéciales (2 h) <ul style="list-style-type: none"> - Equipement de sécurité des tunnels routiers 	2 h	J.C. Martin (CETU)
Examen de validation <ul style="list-style-type: none"> - Tests de validation acquis des cours + étude de cas concrets 	3h	Francesco CHILLE (SNCF Réseau DGII)

MASTERE SPECIALISE : TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS

de la conception à l'exploitation

MODULE 7 : PROJET DE MISE EN SITUATION PROFESSIONNELLE

Durée : 250 h

Crédits ECTS : 14

Présentation générale

Il s'agit d'un projet de type métier, réalisé par groupes de 4 ou 5 étudiants, au cours duquel les étudiants seront amenés à mettre en œuvre, par étapes, leurs connaissances sur un projet réel.

Cet exercice pédagogique vise à mobiliser les compétences individuelles des étudiants en situation professionnelle :

- Connaissance des grandes techniques et technologies mobilisables pour les travaux souterrains
- Maîtrise des principales méthodes d'analyse et de conception, de la réglementation et de la normalisation dans le champ des travaux souterrains
- Recherche documentaire, interaction avec les experts
- Capacité à travailler en équipe, aptitude à animer, à organiser,
- Capacité à communiquer, tant à l'oral qu'à l'écrit

Il constituera une source d'options dans la mesure où chaque étudiant devra choisir d'approfondir des rubriques ou thèmes particuliers de ce projet.

Composition de l'équipe

- **Responsables pédagogiques:** Denis BRANQUE (ENTPE), Gilles Hamaide (CETU), Didier SUBRIN (CETU),

- **Tuteur interne :** Denis BRANQUE (ENTPE), email : denis.branque@entpe.fr,

- **Experts :** Frédéric Bultel (Egis), Benoit Bertrand (Egis), Alberto Puliti (Egis), Mariano Ferrari (Egis), Jean PIRAUD (AFTES), Laurent AUBERT (Soletanche), François Renault (Vinci), Guy Lechantre (Herrenknecht), Martin Beth (SolData), Vincent Legrand (Egis Rail), Florent Prunier (INSA), Fabrice Emeriault (Grenoble INP), Jean Pierre JANIN (Terrasol), Charles Bernuy (Terrasol),

NB : Lors du projet, les étudiants auront la possibilité de consulter l'avis d'experts du domaine (cf liste ci-dessus) lors de séances tutorées. Si besoin, les étudiants pourront par ailleurs poser des questions par messagerie électronique à ces mêmes experts par l'intermédiaire du tuteur interne.

Objectifs pédagogiques proposés

Cet exercice pédagogique vise essentiellement à mobiliser les compétences individuelles des étudiants acquises dans les modules 1 à 6. Il consiste en un projet d'envergure mobilisant une équipe d'ingénierie (correspondant ainsi à une mise en situation professionnelle).

Pré Requis

Ce module nécessite d'avoir suivi tout ou partie des modules 1 à 6.