

**GROUPE DE TRAVAIL « Géotechnique, changement climatique  
et développement durable »**  
**REUNION du Sous-Groupe 2 du 06/01/2023 à 10H**

Réunion en Visio (Teams)

Compte rendu établi par Isabelle HALFON (présidente du GT)  
Copie à Nathalie BORIE (secrétaire du CFMS)

Liste des présents :

Nom	Prénom	Entreprise ou organisme	email	Présent	Absent	Excusé
BARBOSA	Alvaro	SOLETANCHE BACHY	<a href="mailto:alvaro.barbosa@soletanche-bachy.com">alvaro.barbosa@soletanche-bachy.com</a>	X		
BENAHMED	Nadia	INRAE	<a href="mailto:nadia.benahmed@inrae.fr">nadia.benahmed@inrae.fr</a>		X	
BOUSSAFIR	Yasmina	UGE	<a href="mailto:yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr">yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr</a>	X		
CHEVALIER	Christophe	UGE	<a href="mailto:christophe.chevalier@univ-eiffel.fr">christophe.chevalier@univ-eiffel.fr</a>			X
CUISINIER	Olivier	Université Lorraine	<a href="mailto:Olivier.Cuisinier@univ-lorraine.fr">Olivier.Cuisinier@univ-lorraine.fr</a>	X		
CZABANSKI	Charlotte	SNCF Réseau	<a href="mailto:charlotte.czabanski@reseau.sncf.fr">charlotte.czabanski@reseau.sncf.fr</a>			X
DELERABLEE	Yvon	TERRASOL	<a href="mailto:yvon.delerablee@setec.com">yvon.delerablee@setec.com</a>	X		
DI DONNA	Alice	Université Grenoble Alpes	<a href="mailto:alice.di-donna@univ-grenoble-alpes.fr">alice.di-donna@univ-grenoble-alpes.fr</a>		X	
HALFON	Isabelle	BRGM	<a href="mailto:i.halfon@brgm.fr">i.halfon@brgm.fr</a>	X		
HEMMATI	Sahar	UGE	<a href="mailto:sahar.hemmati@univ-eiffel.fr">sahar.hemmati@univ-eiffel.fr</a>			X
IGHIL AMEUR	Lamine	CEREMA	<a href="mailto:lamine.ighil-ameur@cerema.fr">lamine.ighil-ameur@cerema.fr</a>			X
JAOUEN	Timothée	GINGER / BURGEAP	<a href="mailto:t.jaouen@groupeginger.com">t.jaouen@groupeginger.com</a>		X	
LAMBERT	Serge	KELLER	<a href="mailto:serge.lambert@keller.com">serge.lambert@keller.com</a>		X	
LEFEBVRE MIGNON	Valérie	Arcadis	<a href="mailto:valerie.lefebvre@arcadis.com">valerie.lefebvre@arcadis.com</a>	X		
MAKKI	Lamis	UGE	<a href="mailto:lamis.makki@univ-eiffel.fr">lamis.makki@univ-eiffel.fr</a>	X		
MALASSINGNE	Olivier	Cerema	<a href="mailto:Olivier.Malassingne@cerema.fr">Olivier.Malassingne@cerema.fr</a>		X	
MEUNIER	Christophe	ALIOS + USG	<a href="mailto:christophe.meunier@alios.fr">christophe.meunier@alios.fr</a>			X
MEYER	Grégory	Egis	<a href="mailto:Gregory.MEYER@egis-group.com">Gregory.MEYER@egis-group.com</a>	X		
OKYAY	Umur Salih	INFRANEO	<a href="mailto:us.okyay@infraneo.com">us.okyay@infraneo.com</a>		X	
PERLO	Sabrina	CEREMA	<a href="mailto:sabrina.perlo@cerema.fr">sabrina.perlo@cerema.fr</a>		X	
SANFRATELLO	Jean-Pierre	COLAS	<a href="mailto:sanfratello@campus.colas.fr">sanfratello@campus.colas.fr</a>	X		
TANG	Anh Minh	ENPC	<a href="mailto:anh-minh.tang@enpc.fr">anh-minh.tang@enpc.fr</a>	X		
THIERY	Yannick	BRGM	<a href="mailto:y.thiery@brgm.fr">y.thiery@brgm.fr</a>		X	
VASILESCU	Roxana	PINTO GC	<a href="mailto:rvasilescu@pintogc.com">rvasilescu@pintogc.com</a>		X	
VUILLERMET	Eric	BRL Ingenierie	<a href="mailto:Eric.Vuillermet@brl.fr">Eric.Vuillermet@brl.fr</a>	X		



ZUMBO	Vilma	SYSTRA	<a href="mailto:vzumbo@systra.com">vzumbo@systra.com</a>	X		
-------	-------	--------	--	---	--	--

## 1. Ordre du jour

- Informations diverses
- Nouveaux éléments bibliographiques partagés
- Inventaire des effets du chgt climatique par familles d'ouvrages
- Répartition du travail en vue de la prochaine réunion

## 2. Informations diverses

Un article sur le Groupe de travail sera publié dans le prochain numéro des Cahiers Techniques du Bâtiments.

L'avancement du Groupe de travail sera présenté par I.Halfon lors de la conférence SOSCOPE 2023, qui aura lieu à Lyon les 14 et 15/06/2023.

## 3. Nouveaux éléments bibliographiques partagés

L. Ighil Ameer a déposé sur le Teams du GT une nouvelle publication de France Assureurs (mise en ligne il y a 3 semaines) intitulée "Le risque sécheresse et son impact sur les habitations", qui fait suite à la master class du 22/09/2022 (<https://www.youtube.com/watch?v=CtK3LGGF9a8>), à laquelle le BRGM, la MRN, la Compagnie des Experts et le Cerema ont contribué >> <https://www.franceassureurs.fr/assurance-protege-finance-et-emploi/assurance-protege/actualites-protege/risque-secheresse-impact-habitations/>

On peut notamment y lire à la **page 22** les chiffres de la MRN qui montrent une forte croissance de la sinistralité sécheresse (au sens cat-nat) post-2015, avec la sécheresse exceptionnelle 2022 estimée à 2 Md€ en moyenne, même si la fourchette est comprise entre 1,9 et 2,8 Md€ (selon la MRN).

## 4. Effets du changement climatique par familles d'ouvrages géotechniques

Poursuite du travail d'inventaire des effets du changement climatique et des conséquences pour les ouvrages.

11 catégories d'ouvrages ont été définies pour le moment :

1. **Maisons individuelles**
2. **Routes, voiries, chaussées, voies ferrées (ouvrages en service)**
3. Dignes fluviales
4. Pentes naturelles (rocheuses et terrains meubles)
5. **Fondations : superficielles / profondes / dallages**
6. **Soutènements yc composants (ancrages, renforcements, etc.)**
7. Ouvrages hydrauliques (rétablissement, buses, dalots) / réseaux
8. **Ouvrages maritimes : quais, terre-pleins, digues, épis, brise-houles**
9. Ouvrages d'art (ponts, viaducs, tunnels, etc.)
10. Terrassements (travaux)
11. Améliorations de sol / sol renforcé (inclusions rigides, ...)



Une relecture des tableaux concernant les ouvrages en gras ci-dessus est faite en séance. Les commentaires suivants sont faits :

### Commentaires généraux :

Il serait intéressant d'avoir une intervention d'une personne de Météo France, qui pourrait nous présenter les projections sur les prochaines décennies du changement climatique, sur le territoire français. Il est évoqué le nom de J-Ch. Calvet, qui travaille notamment sur des modélisations de l'état hydrique des sols, et qui a été impliqué dans les travaux de thèse de S. Barthélémy (BRGM, université Lorraine), en cours.

- Yasmina Boussafir le connaît et se propose de le contacter.

Voir aussi l'exposé de Patrick JOSSE (Météo France) , lors de la JST de décembre 2021 au CFMS :

[https://www.youtube.com/watch?v=9ZLKuOrYD0w&list=PLQg3J2byMVWLWX2EpBywL\\_DZ0sPvvpLbI&index=3](https://www.youtube.com/watch?v=9ZLKuOrYD0w&list=PLQg3J2byMVWLWX2EpBywL_DZ0sPvvpLbI&index=3)

Il faudra prévoir pour chaque famille d'ouvrages identifiée un paragraphe de présentation, avec des définitions pour bien expliquer et décrire les ouvrages concernés.

Dans tous les cas, dans le document de recommandation qui sera rédigé par le GT, les tableaux seront accompagnés de texte, commentaires ou schémas, pour développer ou expliciter certains points.

### Maisons individuelles : tableau préparé par Sahar, Lamine, Lamis

- Indiquer que l'on considère ici des maisons individuelles sur fondations superficielles.
- Dans les paramètres à considérer, mettre en gras les paramètres les plus importants, et mesurables de façon courante dans le cadre des études G1-ES demandées par la loi Elan.
- Dans la colonne « mesures d'adaptation », le 4 agir sur le sol est à insérer dans le 1 – Agir sur l'environnement. Citer également d'autres solutions que la réhumidification des sols.

### Routes, voiries, chaussées, voies ferrées : tableau préparé par Lamine, Lamis, Vilma

- Tableau rebaptisé « infrastructures linéaires de transport (ouvrages en service) ». On pourrait également le nommer « infrastructures linéaires routières et ferroviaires ».
- Définir le périmètre des infrastructures en question : infrastructures routières et ferroviaires, hors ouvrages d'art (plateforme en remblai, déblai ou rasante).
- Regrouper les lignes 1 et 2 en une qui est la sécheresse / augmentation de l'amplitude et de la fréquence
- Dans les mesures d'adaptation, on peut citer la solution géothermie : qui permet d'abaisser la température de la chaussée pendant les épisodes de forte chaleur, ou de l'augmenter pendant les périodes de gel.
- Dans « agir sur la structure de la chaussée », on peut ajouter la solution de substitution par matériau granulaire ou par traitement à la chaux
- Gel / Dégel : les effets du gel devraient plutôt diminuer dans la perspective du changement climatique. Il est proposé de retirer cette ligne, et un commentaire sera ajouté dans le texte correspondant à ce tableau.
- La même question se pose pour le vent. A voir si on le garde ou pas, avec un commentaire explicatif.
- Ajouter par contre une ligne pour les incendies.



#### Ouvrages maritimes : digues, quais : tableau préparé par Valérie

- Pour les digues, modification du sens d'écoulement des eaux, paramètres à considérer, ajouter « sens des écoulements », compléter la colonne adaptation (pas d'idée en réunion)
- Recul du trait de côte : préciser impact sur les ouvrages de raccordement,
- Pour les quais, préciser qu'il s'agit du retrait du béton,
- Inondations : préciser qu'il s'agit des inondations terrestres qui se propagent vers les ouvrages côtiers.
- De manière générale, voir s'il est possible d'être plus précis dans les solutions d'adaptation.

#### Fondations superficielles et profondes : tableau préparé par Sabrina, Anh-Minh

- Pour la sécheresse, ajouter un renvoi au tableau « maisons individuelles » pour les fondations superficielles.
- Se renseigner sur la mise à jour des eurocodes (notamment de l'eurocode 1, concernant les actions sur les structures, d'origine climatiques) : une mise à jour est prévue pour 2026 ou 2028 => Sabrina se renseigne

#### Soutènements : tableau préparé par Anh-Minh, Christophe M., Alvaro

- Préciser qu'il s'agit d'ouvrages de soutènements hors ouvrages maritimes et fluviaux (traités par ailleurs)
- Sécheresse : préciser ce que sous-entend réduction de la butée. Dans les conséquences, ajouter le possible décollement à l'interface mur/sol
- Inondation et augmentation rapide de la nappe, à clarifier. Peut-être remplacer inondation par fortes précipitations pour l'augmentation rapide de la nappe.

## **5. Prochaines réunions et répartition du travail**

Pour la prochaine réunion (03/02/2023) :

Mettre à jour et compléter les tableaux des effets du changement climatique par catégorie d'ouvrages :

- Dignes fluviales → Yasmina, Sahar, Eric
- Pentés naturelles → Eric, Isabelle
- Ouvrages hydrauliques (rétablissement, buses, dalots) / réseaux → Yasmina, Eric
- Ouvrages maritimes : quais, terre-pleins, digues, épis, brise-houles → Valérie
- Ouvrages d'art → Charlotte, Christophe M.
- Terrassements (travaux) → Yasmina, Vilma, Lamis
- Améliorations de sol / sol renforcé (inclusions rigides, ...) → Isabelle

Pour la réunion suivante (3/03/2023) : mettre à jour les tableaux examinés en réunion en tenant compte des commentaires :

- Maisons individuelles → Sahar, Lamis, Lamine
- Routes, voiries, chaussées, voies ferrées (ouvrages en service) → Vilma, Lamis, Lamine, Charlotte
- Fondations : superficielles / profondes / dallages → Sabrina, Anh-Minh



## 1- Maisons individuelles

Sahar Hemmati (UGE), Lamine Ighil Ameer (Cerema), Lamis Makki (UGE)

Effets du changement climatique	Phénoménologie	Conséquences	Paramètres à considérer	Mesures d'adaptation
Sécheresse prolongée et intense	<ul style="list-style-type: none"> <li>Des cycles de sécheresse/précipitations <b>dérégulés</b> au fil du temps (durant la même année et d'année en année)</li> <li>Extension de retrait-gonflement des argiles au niveau des sols jusque-là épargnés.</li> </ul>	<p><b>1- Sur les sols :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Une profondeur de dessiccation plus importante (en particulier proche des fondations)</li> <li>Une fissuration de dessiccation accentuée et des propriétés hydromécaniques davantage altérées</li> </ul> <p><b>2- Sur les maisons :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Fissures des façades exposées (en escalier, départ des angles d'ouvertures)</li> <li>Écartement des dallages des cloisons</li> <li>Huisseries bloquées</li> </ul> <p><b>3- Sur les aménagements extérieurs</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Fissuration des terrasses, allées (en béton ou bitume)</li> <li>Fissuration (endommagement) des réseaux enterrés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nature des sols en place et localisation de la couche d'argile très plastique (A3/A4),</li> <li>Profondeur maximale de propagation de la sécheresse,</li> <li>Courbe de rétention d'eau,</li> <li>Perméabilité du sol,</li> <li>Courbe de retrait,</li> <li>Environnement proche : végétation, gestion des eaux (pluviales et usées), état des réseaux, etc,</li> <li>Configuration du site : terrain en pente, pourtour de la maison (accessible, nu, etc),</li> <li>Caractéristiques structurelles du bâtiment (présence et type de fondations, chaînages, etc),</li> <li>Bilan météo locale et humidité des sols.</li> </ul>	<p>Quelques exemples de mesures d'adaptation pour réduire la vulnérabilité des maisons exposées au RGA (valables pour les constructions existantes et neuves) :</p> <p><b>1- Agir sur l'environnement proche (gestion des eaux et de la végétation) :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Supprimer la végétation trop proche des façades exposées et/ou fissurées ou mise en place d'écrans anti-racines</li> <li>Vérifier l'état des réseaux et quand cela est possible les écarter des fondations</li> <li>Étanchéifier le pourtour de la maison (par une géomembrane par exemple) avec systématiquement un système de drainage adapté (drain de surface ou tranchée drainante par exemple)</li> </ul> <p><b>2-Agir sur la structure du bâti :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Consolidation par une ceinture en béton armé en l'absence de fondations (maisons anciennes)</li> <li>Adapter les fondations en respectant les dispositions constructives en vigueur (la reprise en sous œuvre des fondations) ou d'autres solutions d'amélioration du sol (injection des résines, etc),</li> </ul> <p><b>3-Agir sur le sol :</b></p> <p>Amélioration des sols sous les fondations par l'injection des résines ou bien par d'autres méthodes de traitement innovantes (recherche en cours),</p> <p><b>4- Agir sur l'état hydrique du sol de fondation (en prévention ou cas de fissures primaires) :</b></p> <p>Réhumidification localisée et contrôlée du sol par l'eau de pluie préalablement récupérée et stockée, comme le procédé expérimental MACH « MAison Confortée par Humidification » du Cerema &gt;&gt; <a href="https://www.cerema.fr/fr/actualites/comprendre-solution-mach-du-cerema-developpement-adaptation">https://www.cerema.fr/fr/actualites/comprendre-solution-mach-du-cerema-developpement-adaptation</a></p> <p><b>Nota :</b> pour les <b>constructions neuves</b>, se référer à l'article 68 de la loi n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (Elan) &gt;&gt; <a href="https://www.ecologie.gouv.fr/sols-argileux-secheresse-et-construction">https://www.ecologie.gouv.fr/sols-argileux-secheresse-et-construction</a></p> <p><b>Pour en savoir plus :</b> ??? À ajouter les liens pour LAMISS (Rouen), SEC 2008, SEC 2015 etc</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Journée d'information et de sensibilisation du Cerema sur les maisons fissurées par la sécheresse du 10 octobre 2022 : replay, présentations et ressources en ligne &gt;&gt; <a href="https://www.cerema.fr/fr/actualites/premiere-edition-journee-nationale-resilience-replay-journee#top-en-savoir-plus">https://www.cerema.fr/fr/actualites/premiere-edition-journee-nationale-resilience-replay-journee#top-en-savoir-plus</a></li> </ul>
Fortes précipitations				

## 2- Infrastructures linéaires de transport (ouvrages en service)

Lamine Ighil Ameer (Cerema)

Lamis Makki (UGE)

Vilma Zumbo (Systra)

Effets du changement climatique	Phénoménologie	Conséquences	Paramètres à considérer	Mesures d'adaptation
<p>Augmentation de la température</p> <p>Augmentation de la fréquence et durée des sécheresses</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baisse excessive de la Wn des terrains en place ou remblais</li> <li>Baisse du niveau des nappes souterraines</li> <li>Destruction de la végétalisation des talus</li> <li>Modification des cycles gel-dégel (barriers de dégel)</li> <li>Augmentation de la température des composants des structures de voies (chaussées ou ferrées)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perte de cohésion des sols ou des couches superficielles</li> <li>Perte de portance,</li> <li>Tassements différentiels des parties supérieures des Terrassements</li> <li>Remontées de fissures ou orniérage des structures de chaussées</li> <li>Erosion des talus par desquamation</li> <li>Dilatation thermique des joints des ouvrages</li> <li>Ramollissement des parties bitumineuses des structures de chaussées</li> <li>Dilatation thermique des rails</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Argilosité des sols mis en remblais</li> <li>Aptitude au traitement</li> <li>Comportement des sols au compactage à l'état sec et très sec</li> <li>Constituants des structures de chaussée</li> <li>Caractéristiques des joints d'ouvrage (notamment dilatation thermique)</li> <li>Choix de matériaux fonction de leur résistance aux températures extrêmes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Protection des talus de remblais / déblais pour limiter l'évapotranspiration : geotextiles spéciaux</li> <li>Choix d'une végétalisation pour des espèces résistantes à la chaleur</li> <li>Réparation des sols par injection</li> <li>Réparation par Infiltration d'eau</li> <li>Systèmes de drainage et collectes de eaux dans des bassins enterrés pour limiter les pertes d'eau par évaporation</li> <li>Circulation routière en mode dégradé avec limitation de la Vitesse ou sur des déviations provisoires en itinéraires bis "non revêtues" : type chemin ruraux</li> <li>Circulation ferroviaires en mode dégradé : limitation de la Vitesse idem pour les franchissement d'ouvrages</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Des cycles de sécheresse/précipitations déréglés au fil du temps (durant la même année et d'année en année)</li> <li>Des sécheresses de plus en plus intenses, fréquentes, précoces et longues conjuguées à des périodes de canicule</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evolution du comportement hydromécanique et de la fissuration de dessiccation des sols argileux</li> <li>Extension du phénomène de RGA (γ compris au niveau des sols jusque-là épargnés)</li> </ul>	<p><u>1- Sur les sols :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Une profondeur de dessiccation plus importante (en particulier sous accotements pour les routes)</li> <li>Une fissuration de dessiccation accentuée et des propriétés hydromécaniques altérées</li> </ul> <p><u>2- Sur les routes :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Fissures longitudinales proches des bords de chaussée accompagnées d'un tassement différentiel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Composition de la structure de chaussée et son entretien</li> <li>Nature des sols en place et localisation de la couche d'argile très plastique (A3/A4)</li> <li>Bilan météo locale et humidité des sols</li> <li>Environnement proche : végétation, gestion des eaux (fossés), largeur des accotements</li> <li>Configuration du site : route sur remblai, terrain en pente, lignes électriques, etc</li> </ul>	<p>Quelques exemples de solutions d'adaptation en cours d'expérimentation :</p> <p><u>1- Agir sur l'environnement proche :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Étanchéification horizontale des accotements (par émulsion et par géomembrane)</li> <li>Étanchéification verticale ou encapsulage</li> <li>Quand cela est possible, transformer les fossés profonds en cunettes d'évacuation (réduction de la surface d'évapotranspiration)</li> </ul> <p><u>2-Agir sur le sol argileux :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Stabilisation physico-chimique (rendre les argiles chimiquement moins sensibles aux variations de teneur en eau)</li> </ul> <p><u>3- Agir sur la structure de chaussée :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Stabilisation mécanique par pose de géogridde</li> <li>Consolidation par pose de blocs de polystyrène expansé</li> </ul> <p><u>Nota :</u> des solutions combinées peuvent être envisagées selon la configuration de la route</p>

## 2- Routes, voiries, chaussées (ouvrages en service)

Lamine Ighil Ameur (Cerema)  
Lamis Makki (UGE)  
Vilma Zumbo (Systra)

Effets du changement climatique	Phénoménologie	Conséquences	Paramètres à considérer	Mesures d'adaptation
Augmentation des pluies extrêmes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erosion par ruissellement</li> <li>Alluvionnement</li> <li>Glissements de terrains et coulées boueuses</li> <li>Chutes de blocs – éboulements rocheux</li> </ul>	<p>Remblais : glissement partiel ou total du remblai et de la superstructure ( chaussée ou ferroviaire ) : interruption de l'exploitation &amp; réparation de l'ouvrage + de la superstructures + équipements ferroviaires )</p> <p>Déblais : glissements de talus plus ou moins importants sur la voie circulée : interruption moins longue sur route que sur voie ferrée</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nature des matériaux mis en place – protections des talus</li> <li>Vulnérabilité géologiques des versants (nature du site erosion , instabilités de pentes )               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hydrogéologie</li> <li>- Hydraulique</li> </ul> </li> <li>= gestion des eaux</li> </ul>	<p>Dimensionnement des dispositifs de drainage des plateformes</p> <p>Collecte des eaux</p> <p>Dispositifs de drainage de type masques ou éperons drainants</p> <p>Renforcement de talus par stabilisations des sols sur la partie extérieures des remblais</p> <p>Déblais : protection des talus rocheux ( géogrilles)</p> <p>Drainage en pied et crête de talus - dispositifs de drainage sur les pentes de type masque ou éperons drainants</p> <p>Déplacement de la route (deviation dans la zone susceptible de glisser</p> <p>Largeur des pièges à Cailloux</p>
Inondations	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erosion externe – érosion interne par immersion de tout ou partie des remblais</li> <li>Remontée de nappe en déblais et submersion de la voie circulée</li> </ul>	<p>affouillement en pied de talus – éboulement partiel / desquamation (scalpage) des talus et fragilisation de l'ouvrage en terre perte de portance de la PST/CDF</p> <p>Gonflement de la partie supérieure des Terrassements</p> <p>Perte de portance</p> <p>→ fissuration et orniérage de la chaussée – déformation de la voie par affaissement par désorganisation de la superstructure (ballast et sous-couche)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transparence hydraulique de l'ouvrage en terre</li> <li>NPHE</li> <li>Hydraulique</li> <li>Hydrogéologie : études du rabattement de nappe</li> <li>Sensibilité à l'eau de la PST et de la CDF</li> <li>Stratégie de matériaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- choix des matériaux dans la zone inondable : matériaux de ZI ou ZH – matériaux traités conception de type digue</li> <li>- Dimensionnement et fréquence des ouvrages hydrauliques de traverse</li> <li>- Adaptation d'itinéraire bis pour le routier</li> <li>- Matériaux de PST-CDF insensibles à l'eau ou rendus insensibles</li> <li>- Voie sur dalle plutôt que voie sur ballast dans les zones les plus submersibles</li> <li>- Ou choix de l'estacade plutôt que du remblai</li> </ul>

## 2- Routes, voiries, chaussées (ouvrages en service)

Lamine Ighil Ameer (Cerema)  
Lamis Makki (UGE)  
Vilma Zumbo (Systra)

Effets du changement climatique	Phénoménologie	Conséquences	Paramètres à considérer	Mesures d'adaptation
Gel-dégel	Variation de volume durant la période de gel (soulèvement) et de dégel (affaissement) Variation de portance des sols sensibles à l'eau.	Tassement et fissures détérioration et dégradation plus ou moins prononcée de la structure Accumulation d'eau gelée dans le sol support en cas de sol sensible au gonflement au gel	Sensibilité au gonflement au gel des sols supports Drainage existant Présence d'un niveau de nappe ou d'un niveau d'eau	Imperméabilisation Drainage efficace des sols supports Renforcement de la structure Modifier la circulation (barrière de dégel)
Vents	<ul style="list-style-type: none"> <li>Augmentation de la fréquence et de l'intensité des vents</li> <li>Vents violents (tornades, cyclones)</li> <li>Poussières</li> <li>:"ensablement " des voies circulées : amas de sables</li> <li>Tempêtes de poussières</li> <li>Contribue aux incendies</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sèchage</li> <li>Érosion des sols et des talus des ouvrages en terre</li> <li>Interruption des circulations: Amas de sols fins ou sables sur les voies</li> <li>Avancée dunaire sur les voies</li> <li>Perte de visibilité</li> <li>Perte de contrôle du véhicule routier</li> <li>Arrachement des caténaires</li> <li>Instabilité latérale des trains</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Érodabilité des sols</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Protection des infras par des merlons végétalisés</li> <li>Circulation routière en mode dégrade : limitation de la vitesse</li> </ul> <p>Voie ferrée :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>circulation en mode dégradé par limitation de la Vitesse</li> <li>Végétalisation des talus par des espèces de faible hauteur</li> <li>Dans les zones à risqué ensablement (sables dunaires ...) : choix de voie sur dalles plutôt que ballast : plus facile à nettoyer</li> </ul>

## 8- Ouvrages maritimes de type digues

Effet changement climatique	phénoménologie	conséquences	Paramètres à considérer	adaptation
Elévation niveau mer	Submersions marines + fréquentes	Sollicitations plus importantes Débits franchissements + grands Salinisation des nappes  Changement des zones d'impact	Niveau d'eau de la mer débits Efforts statiques	Augmentation de la crête de l'ouvrage ou muret en crête ou aménagement arrière en fonction des débits Réaménagement des espaces (recul des ouvrages)  Requalification des espaces
	Vent fort, houle (facteur aggravant) Vagues plus hautes (car – déferlement si prof + grande en pied d'ouvrage)	Impacts dynamiques sur crêtes d'ouvrage	Efforts dynamiques	Renforcement vis à vis de la stabilité
Cette ligne n'a rien à voir avec les digues mais il faut tenir compte de ce phénomène	Écoulements des eaux modifiés (au niveau des fleuves, émissaires)	Diminution des débits d'exhaure, notamment aux grandes embouchures	Niveau d'eau Vitesses des écoulements	?
	Recul trait de côte : nouveau trait de cote Érosion littorale	Éboulement si littoral rocheux Départ de sable si littoral sableux	Niveau d'eau Longueur de recul au niveau du raccordement de la digue avec la cote	Requalification des espaces et des dispositifs de protection

Effet changement climatique	phénoménologie	conséquences	Paramètres à considérer	adaptation
Vent	Houle et vague Poussière avancée dunaire Tempête Sollicitation cyclique	Sollicitations plus importantes	Vitesse du vent	Vérification de la stabilité des Pare vents/ pare embruns
Inondations	Remontée de nappe (digue d'enclôture de terre-plein arrière)	Niveau d'eau arrière plus élevé et donc Poussée d'eau plus élevée Erosion interne	Niveau d'eau en fonction du temps  Différence de niveau d'eau amont/aval et Longueur d'écoulement	Renforcement vis à vis de la stabilité
	surverse	Erosion externe	Vitesse d'écoulement sur le talus externe	Vérification stabilité vis à vis des vitesses

## 8 - Ouvrages maritimes : quais palplanches /quais sur pieux/caissons

Effet changement climatique	Phénoménologie=traduction des modifications liées aux effets	conséquences	Paramètres à considérer	Adaptation
Sécheresse ou Température	Ecarts de Température plus important	Phénomène de retrait plus important en phase travaux Modifications de la rhéologie du béton (élasticité, plasticité, viscosité, fluidité) Phénomène de dilatation thermique plus important Accélération de certaines corrosions Modification possible de l'agressivité des milieux (eau de mer, sol...)	Pour les calculs des bétons ou métalliques : Température Epaisseur de la corrosion élasticité, plasticité, viscosité, fluidité des bétons	Au niveau du béton Au niveau du ferrailage (renforcement si ouvrages existants)
Inondations	Remontée de nappe	Niveau d'eau arrière plus élevé et donc Poussée d'eau plus élevée	Niveau d'eau en fonction du temps Poussée d'eau  Différence de niveau d'eau amont/aval	Renforcement de la stabilité du quai
Vent	Houle et vague Tempête Sollicitation cyclique	Sollicitations plus importantes sur les navires et donc sur les appareils d'amarrage et d'accostage	Efforts de traction	Renforcement des appareils d'amarrage et d'accostage



## 8 - Ouvrages maritimes : quais palplanches /quais sur pieux/caissons

Effet changement climatique	Phénoménologie=traduction des modif liées aux effets	conséquences	Paramètres à considérer	Adaptation
Elévation niveau mer	<p>Submersion marine plus fréquente</p> <p>Recul trait de côte</p>	<p>Sollicitations plus importantes</p> <p>Position des appareils d'amarrage et d'accostage plus adaptée</p> <p>Augmentation des tirants d'eau Moins de dragage (effet positif)</p> <p>Salinisation des nappes / corrosion</p> <p>Augmentation des incertitudes sur les paramètres de dimensionnement souvent combinés tels que Hs Tp, niveau de mer, nombre de vagues...) et donc nécessité peut être de prendre plus de sécurité dans le dimensionnement</p> <p>Poussées supplémentaires en cas de vidange rapide et en phase travaux notamment pour des mises à sec nécessités pour l'entretien</p>	<p>Niveau d'eau Efforts statiques Poussées d'eau</p> <p>Salinité</p>	<p>Augmentation de la cote d'arase de l'ouvrage mais rehausser conduit à une augmentation du poids et donc nécessité de vérifier le dimensionnement (souvent un quai est dimensionné pour 20kPa de surcharge)</p> <p>On pourrait rehausser que la magistrale mais si la dalle arrière est plus basse, on gêne la vision</p> <p>Redisposition des appareils d'amarrage et d'accostage</p> <p>Pour écluse, existence de feuillures (engravures) au niveau des bajoyers pour permettre de mettre des batardeaux provisoires pour mettre à sec – le positionnement de ces feuillures devra être modifié</p> <p>Cohérence avec tous les ouvrages de part et d'autre du quai et derrière le quai</p>

## 8 - Ouvrages maritimes : épis, brise-houle ou brise-lame

Effet changement climatique	phénoménologie	conséquences	Paramètres à considérer	adaptation
Sécheresse	Moins de précipitations Moins d'apports sédimentaires par les fleuves	Accentuation du phénomène d'érosion	Pluie sédimentaire Flux moyen et pic	Rechargement Recalage /repositionnement des ouvrages
Inondations	Embâcles, flux sédimentaires	Perforation pour épis de géosynthétiques remplis de sable	Vitesses d'écoulement Nature des embâcles Niveau d'eau	Renforcement des épis
Elévation niveau mer	Submersions marines + fréquentes Vagues plus hautes (car – déferlement si prof + grande en pied d'ouvrage)	Sollicitations plus grandes Courants plus importants	Niveau d'eau Efforts statiques Vitesse des courants	Rechargement Recalage /repositionnement des ouvrages

## 5- Fondations : superficielles / profondes / dallages

Sabrina, Anh-Minh

Effet changement climatique	phénomé nologie	conséquences	Paramètres à considérer	adaptation
sécheresse	Baisse de la nappe d'eau Baisse de la teneur en eau dans le sol Retrait des sols argileux	Tassement (+ différentiel) dans les fondations superficielles et dallages.  Charge supplémentaire (frottement négatif) pour les fondations profondes.	Teneur en eau Succion Sensibilité au retrait/gonflement (l'argilosité de sols, plasticité). Epaisseur du sol impacté	Mesures pour limiter la variation de la teneur en eau dans le sol (tranchées imperméables autour de la fondation; élimination des arbres à proximité; couverture du sol autour de la fondation;...)  Adapter les fondations à l'augmentation de l'épaisseur du sol impacté.
inondations	Augmentation rapide de la nappe d'eau  Force d'écoulement engendrée par les courants d'eau en surface	Soulèvement des fondations superficielles et dallages Perte de portance  Chargement latéral supplémentaire (poussée de l'eau + avec les débris) Affouillement des sols	Perméabilité du sol  Force du courant Nature du sol (granulométrie)	Augmenter le débit de drainage Mesures pour limiter le soulèvement des fondations (par ancrages, micropieux, etc.)  Protection de la fondation contre les courants d'eau.
Elévation du niveau de mer	Augmentation de la nappe d'eau Salinisation de la nappe	Soulèvement des fondations Corrosion des armatures Erosion du sol autour des fondations	Perméabilité du sol Niveau d'eau Salinité	Augmentation de l'enrobage Protection extérieure contre la corrosion Adapter la formulation du béton



Vent	Augmentation de la charge latérale Chargement cyclique	Rupture du lien entre la superstructure et la fondation Déstabilisation de la fondation Déplacement Fatigue (détérioration de la résistance du sol et de la fondation).	Force du vent Comportement cyclique de la fondation et du sol	Réviser le dimensionnement pour tenir compte du comportement cyclique du sol et de la charge liée au vent
Incendie	Surchauffe de la partie supérieure de la fondation	Endommagement du lien entre la superstructure et la fondation. Endommagement du béton de la partie supérieure de la fondation.	Résistance au feu du béton	Adapter la formulation du béton Protection contre le feu
Gel/dégel	Changement de profondeur de la couche gelée  Augmentation de la salinité du sol dans les zones près de routes (liée au salage de routes)	Endommagement du béton lié aux cycles de gel/dégel Mouvement de la fondation superficielles et des dallages lié aux cycles de gel/dégel  Corrosion des armatures	Niveau de gel (température, et durée de la période de gel) Profondeur de la couche de sol gelé  Salinité du sol	Niveau de la fondation superficielle et des dallages à adapter.  Augmentation de l'enrobage Protection extérieure contre la corrosion Adapter la formulation du béton

## 6- Soutènements yc composants (ancrages, renforcements, etc.)

Anh-Minh, Christophe M. Alvaro

Effet changement climatique	phénoménologie	conséquences	Paramètres à considérer	adaptation
sécheresse	Baisse de la teneur en eau Retrait de sols argileux Baisse de la nappe d'eau	Fissure dans des sols argileux qui pourraient réduire la stabilité de l'ouvrage Réduction de butée en aval avec le retrait des sols argileux	Succion Teneur en eau Sensibilité au retrait/gonflement (l'argilosité de sols, plasticité, carte aléas).	Prise en compte dans le dimensionnement (réduction de butée, augmentation de poussée)
inondations	Augmentation rapide du niveau de la nappe	Augmentation de la poussée Réduction de la butée  Rupture du soutènement Soulèvement du fond de fouille	Niveau de la nappe Période de retour des crues  Perméabilité du terrain	Amélioration du système de drainage et rabattement de la nappe  Réviser le dimensionnement
Elévation du niveau de mer	Submersion des ouvrages Hausse du niveau de la nappe Augmentation de la salinité du sol	Augmentation de la poussée sur l'ouvrage  Corrosion (ancrages, renforcements, armatures, palplanches, etc.)	Niveau de la nappe Période de retour des crues  Perméabilité du terrain  Salinité du sol	Réviser le dimensionnement  Protection contre la corrosion



Vent	Augmentation du chargement en tête (soutènement porteur exposé au vent)  Chargement cyclique	Rupture du lien entre la superstructure et la fondation Déstabilisation de la fondation Déplacement Fatigue (détérioration de la résistance du sol et de la fondation).	Force du vent Comportement cyclique du soutènement et du sol	Réviser le dimensionnement pour tenir compte du comportement cyclique du sol et de la charge liée au vent
Incendie	Surchauffe du soutènement	Endommagement du soutènement (butons, murs, tête d'ancrage et de tirant, ...).	Résistance au feu des matériaux	Protection contre le feu
Température	Hausse de la température moyenne Hausse de la variation de la température	Dilatation thermique des matériaux (les plus sensibles sont les matériaux métalliques)	Gamme de la variation de la température	Surveillance accrue et mise en place de systèmes adaptés  Réviser le dimensionnement
Gel/dégel	Changement de profondeur de la couche gelée  Augmentation de la salinité du sol dans les zones près de routes (liée au salage de routes)	Endommagement du béton lié aux cycles de gel/dégel  Corrosion des armatures, ancrages, tirants, ...	Niveau de gel (température, et durée de la période de gel)  Salinité du sol	Protection contre le gel  Protection extérieure contre la corrosion Adapter la formulation du béton