

**GROUPE DE TRAVAIL « Géotechnique, changement climatique  
et développement durable »**  
**REUNION du Sous-Groupe 2 du 09/12/2022 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 | 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       |        |
| JOSEPH*         | Agnes       | CEREMA                    | <a href="mailto:gnes.Joseph@cerema.fr">gnes.Joseph@cerema.fr</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

- Inventaire des effets du chgt climatique par familles d'ouvrages
- Répartition du travail en vue de la prochaine réunion

## 2. 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, ...)

Pour chaque famille d'ouvrages, un tableau a été préparé par les membres du SG2 (voir annexe du présent compte-rendu et fichier sur Teams [Brainstorming SG2 v2022-11-18 AMT.pptx](#)). Une relecture des tous les tableaux est faite en réunion. Elle amène les commentaires suivants :

- Il faudra prévoir pour chaque famille d'ouvrages identifiée un paragraphe de présentation / définition pour bien expliquer et décrire les ouvrages concernés.
- Les effets du changement climatique (sécheresse, précipitations, etc.) sont à considérer vis-à-vis de leur accentuation en termes de fréquence ou d'intensité dans les années à venir. Par exemple, la problématique de la sécheresse pour les maisons individuelles est à considérer dans la perspective d'une accentuation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de sécheresse, qui conduisent notamment à une extension des conséquences sur une plus grande surface du territoire, et à un approfondissement de l'épaisseur de sol impactée.
- Il convient de bien différencier la phénoménologie des conséquences, les conséquences étant celles qui concernent la famille d'ouvrage considérée.
- La plupart des phénomènes climatiques (exemple sécheresse) se retrouvent dans tous les tableaux. Les aspects de phénoménologie à décrire sont ceux qui sont associés au type d'ouvrage considéré.
- Des développements et précisions sont à apporter dans les différents tableaux, pour la phénoménologie, les conséquences, les paramètres et l'adaptation. Les cases vides sont à compléter.
- Il est décidé que chaque binôme ou trinôme se concerte pour une mise à jour de chaque tableau.



Une relecture sera effectuée à la prochaine réunion.

Un travail d'homogénéisation des termes, définitions, sera également à entreprendre, lors de la prochaine réunion.

### **3. Elaboration d'un sommaire des futures recommandations**

Partie non traitée lors de la réunion du 9/12/2022.

Les échanges du jour permettent d'affiner et compléter le sommaire de futures recommandations :

1. Objet / Périmètre / cadrage des recommandations
  - a. Contexte changement climatique et intensification / augmentation fréquence de certains phénomènes
  - b. Périmètre géographique : France métropolitaine et outre-mer
2. Liste des différents effets du changement climatique et des conséquences pour ouvrages et risques naturels
  - a. Sécheresse
  - b. Inondation
  - c. Fortes précipitations
  - d. Température
  - e. élévation niveau mer
  - f. Vent (augmentation intensité ou nouvelles zones exposées)
  - g. Incendie
3. Données d'entrée, sites d'informations, documents de référence
  - a. Informations actuelles (météo France, élévation niveau mer...)
  - b. Projections pour les prochaines décennies (citer les sources d'information)
  - c. ...
4. Prise en compte des effets dans le dimensionnement
5. Ouvrages neufs : choix de conception
6. Adaptation des ouvrages existants par familles d'ouvrages
  - a. Réduction de la vulnérabilité
7. Exemples : études de cas

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

Pour la prochaine réunion (06/01/2022) :

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



1. Maisons individuelles → Sahar, Lamis, Lamine
2. Routes, voiries, chaussées, voies ferrées (ouvrages en service) → Vilma, Lamis, Lamine, Charlotte
3. Dignes fluviales → Yasmina, Sahar, Eric
4. Pentés naturelles → Eric, Isabelle
5. Fondations : superficielles / profondes / dallages → Sabrina, Anh-Minh
6. Soutènements yc composants (ancrages, renforcements, etc.) → Anh-Minh, Christophe M.
7. Ouvrages hydrauliques (rétablissement, buses, dalots) / réseaux → Yasmina, Eric
8. Ouvrages maritimes : quais, terre-pleins, digues, épis, brise-houles → Valérie
9. Ouvrages d'art → Charlotte, Christophe M.
10. Terrassements (travaux) → Yasmina, Vilma, Lamis
11. Améliorations de sol / sol renforcé (inclusions rigides, ...) → Isabelle

Prochaines réunions :

- **06/01/2023 à 10h (Teams)**
- **03/02/2022 à 10h (Teams)**

1oooooooooooooooooooo

Lamis, Lamine, Sahar

## 1- Maisons individuelles

| Effet changement climatique | Phénoménologie   | Conséquences   | Paramètres à considérer   | Adaptation   |
|-----------------------------|--|--|---|--|
| sécheresse                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution de la teneur en eau</li> <li>- Retrait de sol (changement de volume)</li> <li>- Fissures dans le sol (apparition des vides)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tassement de sol &gt;&gt;&gt; tassement/différentiel fondations et dallages</li> <li>- Fissuration des murs et des dallages</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Courbe de rétention d'eau (teneur en eau et succion)</li> <li>- Argilosité des sols</li> <li>- Courbe de retrait</li> <li>- Profondeur maxi de propagation de la sécheresse</li> <li>- Présence de végétation</li> </ul> | <p><u>Maisons neuves :</u><br/>Adaptation des dispositions constructives (chainage h et v, armatures, dimensionnement des fondations, approfondissement, sous sol, vide sanitaire /technique, dalle portée, etc.), Mesures pour limiter la variation de la teneur en eau dans le sol (tranchées imperméables autour de la fondation, élimination des arbres à proximité/ écran anti racines, couverture du sol autour de la fondation.</p> <p><u>Maisons existantes :</u><br/>- Mesures pour limiter la variation de la teneur en eau dans le sol (tranchées imperméables autour de la fondation), élimination des arbres à proximité / écran anti racines, couverture du sol autour de la fondation, Reprise en sous oeuvre des fondations (approfondissement/ élargissement)<br/>Injection des sols (résine, etc)</p>  |
| Fortes précipitations       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inondation</li> <li>Augmentation de la teneur en eau (présence des fissures),</li> <li>Augmentation de la perméabilité,</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Soulèvement /gonflement ou tassement /consolidation des fondations superficielles et dallages selon la charge transmise par la structure</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perméabilité du sol</li> <li>Argilosité des sols (variation volumique)</li> <li>Courbe de retrait</li> <li>Courbe de rétention d'eau</li> </ul>  | <p><u>Maisons neuves :</u><br/>Adaptation des dispositions constructives (chainage h et v, armatures, dimensionnement des fondations, approfondissement, sous sol, vide sanitaire /technique, dalle portée, etc.) 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;...).</p> <p>Système de drainage (tranchée drainante par exemple)</p> <p><u>Maisons existantes :</u><br/>- Mesures pour limiter la variation de la teneur en eau dans le sol (tranchées imperméables autour de la fondation, élimination des arbres à proximité / écran anti racines, couverture du sol autour de la fondation, Reprise en sous oeuvre des fondations<br/>Injection des sols (résine, etc)<br/>Système de drainage (tranchée drainante par exemple)</p> |

Lamine Ighil Aneur

## 1- Maisons individuelles

| Effet changement climatique (post 2015)   | Phénoménologie   | Conséquences  | Paramètres à considérer   | Adaptation  |
|---|--|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Des cycles de sécheresse/précipitations déréglés</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 (y compris 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 proche des fondations)</li> <li>• Une fissuration de dessiccation accentuée et des propriétés hydromécaniques altérées</li> </ul> <p><u>2- Sur les maisons :</u></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><u>3- Sur les aménagements extérieurs :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fissuration des terrasses, allées (en béton ou bitume)</li> <li>• Fissuration des réseaux enterrés</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractéristiques structurelles du bâtiment (présence et type de fondations, chaînages, etc)</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 (pluviales et usées), état des réseaux, etc</li> <li>• Configuration du site : terrain en pente, pourtour de la maison (accessible, nu, etc)</li> </ul> | <p>Quelques exemples de solutions d'adaptation pour réduire la vulnérabilité de la maison :</p> <p><u>1- Agir sur l'environnement proche :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Supprimer la végétation trop proche des façades exposées et/ou fissurées</li> <li>• Vérifier l'état des réseaux</li> <li>• Étanchéifier le pourtour de la maison (par une géomembrane par exemple) avec systématiquement un système de drainage adapté</li> </ul> <p><u>2- Agir sur la structure du bâti :</u></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</li> </ul> <p><u>3- Agir sur l'état hydrique du sol de fondation (en prévention ou cas de fissures primaires) :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réhumidification localisée et contrôlée du sol par l'eau de pluie préalablement récupérée et stockée (procédé expérimental MACH "MAison Confortée par Humidification")</li> </ul> <p><i>Nota :</i> pour les nouvelles constructions, se référer à l'article 68 de la Loi Elan + dispositions de l'environnement proche</p> |

Vilma, Lamis, Lamine

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

| Effet changement climatique       | phénoménologie  | conséquences  | Paramètres à considérer   | adaptation   |
|-----------------------------------|---|---|---|--|
| Sécheresse                        | Diminution de la teneur en eau de la PST  | - Tassement<br>fissures   | - Argilosité<br>- Compactage  | - Imperméabilisation<br>Élimination de la végétation à proximité (entretien)/<br>écran anti racines                                      |
| Inondations/Fortes précipitations | Augmentation de la teneur en eau  | - Surcharge (tassement)<br>Rupture<br>Erosion   | - Argilosité<br>Compactage<br>Système de drainage<br>Niveau de la nappe<br>Terrain en pente (glissement)                      | - Réviser le système de drainage/ entretien<br>- Réviser le dimensionnement (CBR, etc)   |
| Gel-dégel                         | Variation de volume durant la période de gel (soulèvement) et de dégel (affaissement)<br>Variation de portance des sols sensibles à l'eau | Tassement<br>Fissures<br>détérioration et dégradation plus ou moins prononcée de la structure<br>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<br>Drainage existant<br>Présence d'un niveau de nappe ou d'un niveau d'eau | Imperméabilisation<br>Drainage efficace des sols supports<br>Renforcement de la structure<br>Modifier la circulation (barrière de dégel) |
|                                   |   |   |   |  |
|                                   |   |   |   |  |
|                                   |   |   |   |  |

Lamine Ighil Ameer

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

| Effet changement climatique (post 2015)   | Phénoménologie   | Conséquences  | Paramètres à considérer   | Adaptation   |
|---|--|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Des cycles de sécheresse/précipitations déréglés</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 (y compris 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> |

Vilma

## 2 -Routes &amp; Voiries – chaussées, voie ferrée...

| Effet changement climatique      | phénoménologie  | conséquences   | Paramètres à considérer  | 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 érosion , 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> |
|                                  |   |  |  |   |
|                                  |   |  |  |   |
|                                  |   |  |  |   |
|                                  |   |  |  |   |

## 2 - Routes &amp; Voiries – chaussées, voie ferrée...

| Effet changement climatique                              | phénoménologie   | conséquences   | Paramètres à considérer   | adaptation   | Vilma |
|--|--|--|---|--|-------|
| 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<br/>→ 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</li> <li>conception de type digue</li> <li>Dimensionnement et fréquence des ouvrages hydrauliques de traverse</li> <li>Adaptation d'un 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 remblais</li> </ul> |       |
| Augmentation de la température – étés secs et Sécheresse |  |  |   |  |       |
| vents  |  |  |   |  |       |
| Incendies  |  |  |   |  |       |

## 3- Ouvrage / Catégorie d'ouvrage : Digue Fluviale

Eric, Sahar, Yasmina

| Effet changement climatique | phénoménologie  | conséquences   | Paramètres à considérer  | adaptation  |
|-----------------------------|---|--|--|---|
| sécheresse                  | Période climatique se caractérisant par une augmentation de la température, une réduction de la pluviométrie, une baisse du niveau de la nappe phréatique | <ul style="list-style-type: none"> <li>Desiccations des sols avec réduction de volume, diminution de la hauteur de l'ouvrage, apparition de fissures selon les matériaux</li> <li>Diminution de la perméabilité des sols dans les ouvrages et sur les terrains naturels</li> <li>Modification du ruissellement sur les sols et de l'hydrogramme de crue</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Retrait volumique des sols</li> <li>Courbe de rétention d'eau</li> <li>Évaluation de la perméabilité non saturé</li> <li>Probabilité d'apparition d'une crue soudaine en période de sécheresse</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Protection en surface par des matériaux insensibles au retrait-gonflement ?</li> <li>Monitoring d'ouvrage pour suivre l'état des sols sensibles au retrait-gonflement</li> </ul> |
| inondations                 | Augmentation soudaine du niveau d'eau suite à un événement pluvieux ou éventuellement à une remontée de nappe phréatique                                  | Défaillance hydraulique de la digue en cas de niveau d'eau supérieur au niveau de protection<br>Instabilité talus, glissement de terrain   | Hydrogramme de crue<br>Evolution des hydrogrammes avec le changement climatique  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Modifier le niveau de protection, surélévation de l'ouvrage, création de fusibles</li> <li>Renforcer la protection contre l'érosion externe</li> </ul>                           |
| Elévation du niveau de mer  | Augmentation du niveau moyen de la mer et des risques de submersion marine  | Défaillance hydraulique de la digue  | ?  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Renforcer la protection contre l'érosion externe</li> <li>Modifier le niveau de protection, surélévation de l'ouvrage</li> <li>Modifier l'urbanisation</li> </ul>                |
| Vent                        | Sans objet  |  |  |   |
| Incendie                    | Incendie de la végétation, augmentation de la température   | Desiccation des sols<br>Modification de la perméabilité des sols en surface<br>Modification du type de végétation à la reprise<br>Destruction/dégradation de matériaux type géosynthétiques, bétons, buses, etc.   | Gestion du risque incendie   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Travaux de maintenance et d'entretien</li> <li>Suivi et inspection d'ouvrage après évènement</li> </ul>  |

## 4- Ouvrage / Catégorie d'ouvrage : Pentes naturelles

Isabelle

| Effet changement climatique         | phénoménologie  | conséquences   | Paramètres à considérer   | adaptation  |
|-------------------------------------|---|--|---|---|
| Sécheresse, fortes températures     | Desiccation, augmentation du ruissellement, augmentation du risque de crue soudaine des cours d'eau                                       | Cf. inondation / fortes précipitations   | Nature des sols (sols fins ou granulaires) et des roches<br>Teneur en eau   | Cf. inondation / fortes précipitations  |
| Inondations / Fortes précipitations | Erosion des pentes<br>Affouillement des pieds de talus et berges de torrents / rivières,<br>Augmentation rapide de la saturation des sols | Glissements de terrain<br>Coulées de boues (laves torrentielles, lahars)<br>Eboulements rocheux<br>Erosion des berges des cours d'eau (ex. tempête Alex) | Nature des sols (sols fins ou granulaires) et des roches<br>Teneur en eau<br>Degré de saturation<br>Niveau de la nappe<br>Hauteur de précipitation par événement<br>Qualité massif rocheux<br>Pente | Protection des berges des cours d'eau<br>Révisions des PPR, et plans d'urbanisme<br>Interdiction de construire<br>Drainage des pentes et talus<br>Dispositifs de rétention (filets, merlons, etc.)<br>Renforcement des talus (clouage, tirants, etc.) |
| Elévation du niveau de mer          | Erosion des pieds de falaises (pour les falaises littorales)<br>Submersion marine   | Recul du trait de côte<br>Instabilités gravitaires des falaises littorales (glissement de terrain, éboulements rocheux)                                  | Hauteur marnage<br>Niveau des plus hautes eaux<br>Incidence houle<br>Résistance mécanique des falaises<br>Qualité du massif rocheux   | Création d'épis, renforcement des falaises dans les zones à enjeu<br>Révisions des PPR, et plans d'urbanisme<br>Interdiction de construire  |
| Vent                                | Avalanches (en montagne)<br>destruction des arbres → favorise le ruissellement  | destruction des arbres → favorise le ruissellement   | Pente   | Dispositifs de rétention  |
| Incendie                            | Disparition du couvert végétal, augmentation du ruissellement<br>Eclatement de roches   | Cf. inondation / fortes précipitations   | Cf. inondation / fortes précipitations  | Entretien des forêts  |
| Gel / Degel                         | Eclatement des roches (cryoclastie),<br>détachement de blocs rocheux  | Eboulements rocheux<br>Tassement des fondations de   | Qualité du massif rocheux<br>(fracturation, enfoncement   | Dispositifs de rétention (filets, ...)<br>Renforcement clouage falaises   |

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

Anh-Minh, Christophe M.,  
Alvaro

| Effet changement climatique | phénoménologie  | conséquences                                  | Paramètres à considérer                   | adaptation  |
|-----------------------------|---|---|---|---|
| sécheresse                  | Modification de la teneur en eau<br>Retrait                             | Modification des caractéristiques du sol      | Succion, teneur en eau, cohésion          |   |
| inondations                 | Augmentation du niveau de la nappe                                      | Surcharge<br>Rupture                          | Système de drainage<br>Niveau de la nappe | Amélioration du système de drainage<br>Réviser le dimensionnement |
| Elévation du niveau de mer  | Submersion des ouvrages<br>Hausse du niveau de la nappe                 | Augmentation de la poussée sur l'ouvrage      |   |   |
| Vent                        | Augmentation du chargement en tête (soutènement porteur exposé au vent) | Augmentation des sollicitations sur l'ouvrage | Descente de charge à recalcer             | Justification structurelle (cas de charge à déterminer)           |
| Incendie                    |   | Résistance au feu                             |   |   |
|                             |   |   |   |   |

## 5- Fondations : superficielles / profondes / dallages

Sabrina, Anh-Minh

| Effet changement climatique | phénoménologie  | conséquences   | Paramètres à considérer   | adaptation  |
|-----------------------------|---|--|---|---|
| sécheresse                  | Baisse de la nappe d'eau<br>Baisse de la teneur en eau dans le sol<br>Retrait des sols argileux | Tassement (+ différentiel) dans les fondations superficielles et dallages.<br><br>Charge supplémentaire (frottement négatif) pour les fondations profondes.                        | Teneur en eau<br>Succion<br>Sensibilité au retrait/gonflement (l'argilosité de sols, plasticité).<br>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;...)<br><br>Adapter les fondations à l'augmentation de l'épaisseur du sol impacté. |
| inondations                 | Augmentation rapide de la nappe d'eau<br><br>Courant d'eau                                      | Soulèvement des fondations superficielles et dallages<br>Perte de portance<br><br>Chargement latéral supplémentaire (poussée de l'eau + avec les débris)<br>Affouillement des sols | Perméabilité du sol<br><br>Force du courant<br>Nature du sol (granulométrie)  | Augmenter le débit de drainage<br><br>Protection de la fondation contre les courants d'eau.   |
| Elévation du niveau de mer  | Augmentation de la nappe d'eau<br>Salinisation de la nappe                                      | Soulèvement des fondations<br>Corrosion des armatures<br>Erosion du sol autour des fondations  | Niveau d'eau<br>Salinité  | Augmentation de l'enrobage<br>Protection extérieure contre la corrosion   |
| Vent                        | Augmentation de la charge latérale<br>Chargement cyclique                                       | Rupture<br>Déplacement<br>Fatigue  | Force du vent<br>Comportement cyclique  | Réviser le dimensionnement  |
| Incendie                    | Surchauffe  | Résistance au feu<br>Dilatation thermique  | -   | -   |

Eric, Yasmina

**7- Ouvrage / Catégorie d'ouvrage : ouvrages hydrauliques (rétablissements, buses, dalots...)**

| Effet changement climatique | phénoménologie  | conséquences  | Paramètres à considérer   | adaptation   |
|-----------------------------|---|---|---|--|
| sécheresse                  | Période climatique se caractérisant par une augmentation de la température, une réduction de la pluviométrie, une baisse du niveau de la nappe phréatique | <ul style="list-style-type: none"> <li>Modification du fil d'eau en cas de retrait</li> <li>Desiccations des sols avec réduction de volume, apparition de fissures selon les matériaux</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Retrait volumique des sols</li> <li>Inspection de l'ouvrage et détection des anomalies type déchaussement, tassements différentiels, déjoints, etc.</li> </ul> | Travaux de maintenance et entretien  |
| inondations                 | Augmentation soudaine du niveau d'eau suite à un événement pluvieux ou éventuellement à une remontée de nappe phréatique                                  | Mise en charge des ouvrages<br>Érosion externe<br>Affouillement<br>Débordement  | La période de retour des crues<br>Evolution de la période de retour des crues selon le changement climatique  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Renforcer la protection contre l'érosion externe</li> <li>Travaux de maintenance et d'entretien</li> <li>Suivi et inspection d'ouvrage</li> </ul> |
| Elévation du niveau de mer  | Sans objet  |   |   |  |
| Vent                        | Sans objet  |   |   |  |
| Incendie                    | Feu, incendie, augmentation de la température   | Destruction/dégradation de matériaux type géosynthétiques, bétons, buses, etc.  | Gestion du risque incendie  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Travaux de maintenance et d'entretien</li> <li>Suivi et inspection d'ouvrage</li> </ul>   |

**8- Ouvrages maritimes de type digues**

Valérie

| Effet changement climatique | phénoménologie  | conséquences   | Paramètres à considérer                     | adaptation   |
|-----------------------------|---|--|---|--|
| Elévation niveau mer        | Submersions marines + fréquentes  | Sollicitations plus importantes<br>Débits franchissements + grands<br>Salinisation des nappes<br><br>Changement des zones d'impact | Niveau d'eau<br>débits<br>Efforts statiques | Augmentation de la crête de l'ouvrage ou muret en crête ou aménagement arrière en fonction des débits<br>Réaménagement des espaces (recul des ouvrages)<br><br>Requalification des espaces |
|                             | Vent fort, houle (facteur aggravant)<br>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   |
|                             | Ecoulements des eaux (fleuves, émissaires)  | Modification des Ecoulements gravitaires (diminution des débits d'exhaure, notamment aux grandes embouchures)                      |   |  |
|                             | Recul trait de côte : nouveau trait de cote<br>Érosion littorale  | Éboulement si littoral rocheux<br>Départ de sable si littoral sableux  |   | Requalification des espaces et des dispositifs de protection   |

## 8- Ouvrages maritimes de type digues

Valérie

| Effet changement climatique | phénoménologie  | conséquences  | Paramètres à considérer  | adaptation  |
|-----------------------------|---|---|--|---|
| Vent                        | Houle et vague<br>Poussière<br>avancée dunaire<br>Tempête<br>Sollicitation cyclique | Sollicitations plus importantes   | Vitesse du vent  | Vérification de la stabilité des Pare vents/ pare embruns |
| Inondations                 | Remontée de nappe<br>(digue d'enclosure de terre-plein arrière)                     | Niveau d'eau arrière plus élevé et donc<br>Poussée d'eau plus élevée<br>Erosion interne | NN en fonction du temps<br><br>DH amont/aval et<br>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

Valérie

| Effet changement climatique  | phénoménologie                                       | conséquences  | Paramètres à considérer   | adaptation  |
|------------------------------|--|---|---|---|
| Sécheresse ou<br>Température | Température avec écart de t° plus important          | Calcul béton ou métallique<br>Effet du retrait en phase travaux<br>Effet de la dilatation thermique   | température   | Au niveau du béton<br>Au niveau du ferrailage<br>(renforcement si ouvrages existants)   |
| Inondations                  | Remontée de nappe                                    | Niveau d'eau arrière plus élevé et donc<br>Poussée d'eau plus élevée  | NN en fonction du temps<br>Poussée d'eau<br><br>DH de part et d'autre du quai | Renforcement de la stabilité du quai  |
| Elévation niveau mer         | Submersion marine<br><br><br><br>Recul trait de côte | Sollicitations plus importantes<br><br>Position des appareils d'amarrage et d'accostage plus adaptée<br><br>Augmentation des tirants d'eau<br>Moins de dragage<br><br>Salinisation des nappes / corrosion | Niveau d'eau<br>Efforts statiques<br><br><br>Salinité                         | Augmentation de la cote d'arase de l'ouvrage<br>Rédisposition des organaux d'amarrage et d'accostage<br><br>Réaménagement des équipements et réseaux<br><br>Augmentation de l'enrobage<br>Protection extérieure contre la corrosion |
| Vent                         |  | Sollicitations plus importantes sur les navires et donc sur les appareils d'amarrage et d'accostage   |   | Renforcement des appareils d'amarrage et d'accostage  |

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

Valérie

| Effet changement climatique | phénoménologie  | conséquences  | Paramètres à considérer                                   | adaptation   |
|-----------------------------|---|---|---|--|
| Sécheresse                  | Moins de précipitations<br>Moins d'apports sédimentaires par les fleuves                                      | Accentuation du phénomène d'érosion                     |   | Rechargement<br>Recalage<br>/repositionnement des ouvrages   |
| Inondations                 | Sans objet  |   |   |  |
| Élévation niveau mer        | Submersions marines + fréquentes<br>Vagues plus hautes (car – déferlement si prof + grande en pied d'ouvrage) | Sollicitations plus grandes<br>Courants plus importants | Niveau d'eau<br>Efforts statiques<br>Vitesse des courants | Rechargement<br>Recalage<br>/repositionnement des ouvrages   |
|                             | Recul trait de côte<br>Érosion littorale  | Départ de sable si littoral sableux                     |   | Requalification des espaces et des dispositifs de protection |

Epi = ouvrage en enrochement relativement court qui avance dans la mer depuis la plage et dont la fonction principale est d'interrompre le transit littoral de sédiments afin de constituer ou de retenir des plages à un niveau plus élevé (et souvent, par-là même, de protéger un ouvrage de défense contre la mer existant)  
Brise-lame = émergent à la surface (au moins pendant la majeure partie du cycle de marée), ils sont disposés approximativement parallèlement à la côte. Leur fonction est de réduire l'action de la houle et d'encourager la déposition de sédiments à l'arrière de l'ouvrage.

## 9 - Ouvrage / Catégorie d'ouvrage : Ouvrages d'art (Ponts, tunnels, ...?)

Charlotte, Christophe

| Effet changement climatique | phénoménologie   | conséquences  | Paramètres à considérer   | adaptation  |
|-----------------------------|--|---|---|---|
| sécheresse                  | Retrait dans les sols argileux<br>Températures plus élevées  | Tassements des fondations superficielles<br>Dilatation de structures  | Profondeur de dessiccation<br>Sollicitations complémentaires sur les appuis | Augmenter la profondeur d'encastrement<br>Revoir le dimensionnement |
| inondations                 | Augmentation du niveau de la nappe, des débits dans les cours d'eau, des circulations et pressions (tunnels) | Efforts complémentaires piles de pont<br>Affouillement des piles et culées<br>Débits et pressions plus élevés (tunnels) |   | Drainage complémentaire<br>Dimensionnement à revoir.                |
| Élévation du niveau de mer  | Augmentation du niveau de la nappe<br>Augmentation taille des vagues   |   | Niveau d'eau<br>Efforts appliqués   |   |
| Vent                        | Pressions positives/négatives  | Efforts complémentaires sur structures  |   |   |
| Incendie                    | Fortes températures  | Dégradation qualité béton   |   |   |
|                             |  |   |   |   |

**10- Ouvrage / Catégorie d'ouvrage : Terrassements (travaux)**

Lamis, Vilma, Yasmina

| Effet changement climatique | phénoménologie   | conséquences  | Paramètres à considérer   | adaptation   |
|-----------------------------|--|---|---|--|
| sécheresse                  | Période climatique se caractérisant par une augmentation de la température, une réduction de la pluviométrie   | Réduction de la teneur en eau des sols (états sec à très sec)<br>Difficulté à compacter les sols secs<br>Impossibilité de compacter des sols très secs<br>Nécessité de prélever de l'eau pour humidifier les sols<br>Augmentation de la production de poussières sous circulation<br>Diminution du nombre de jours d'intempérie<br>Difficulté à traiter les sols par des liants hydrauliques (diminution du temps de prise, nécessité d'ajouter de l'eau) | Statistiques météorologiques au moment des travaux<br>évolutions probables des statistiques météorologiques avec le changement climatique | Modifier les règles de définition des intempéries<br>Créer une intempérie pour sécheresse et pas uniquement pour gel, pluie ou tempête |
| inondations                 | Augmentation soudaine du niveau d'eau suite à un événement pluvieux ou éventuellement à une remontée de nappe phréatique<br>Augmentation du ruissellement et de coulées boueuses | Coupure des voies de circulation<br>Erosion des sols, ravinement, dégradation des ouvrages  | Cartographie du risque inondation   |  |
| Elévation du niveau de mer  |  |   |   |  |
| Vent                        |  | Envol de poussière ou de pulvérulent<br>Risque pour la sécurité en circulation<br>Risque pour la sécurité des grues   |   |  |
| Incendie                    |  |   |   |  |
| Gel-dégel                   |  | Intempérie, impossibilité de traiter les sols, couler du béton  |   |  |

**11 - Ouvrage / Catégorie d'ouvrage : Amélioration / renforcement de sols**

Isabelle

| Effet changement climatique          | phénoménologie   | conséquences   | Paramètres à considérer             | adaptation  |
|--------------------------------------|--|--|-------------------------------------|---|
| Sécheresse, fortes températures      | Dessiccation des sols  | Impacts travaux terrassements (matelas de répartition)   | Teneur en eau naturelle et optimale | Arrosage pendant les travaux<br>Impacts économique  |
| Inondations et fortes précipitations | Saturation des terrains  | Impacts travaux terrassements (matelas de répartition)<br>Perte de portance en phase travaux                               | Teneur en eau naturelle et optimale | Arrêts de chantier (impacts délais et coûts)  |
| Elévation du niveau de mer           | Augmentation du niveau de nappe en zone littorale<br>Biseau salé | Corrosion des armatures et renforcements métalliques<br>Erosion du sol autour des fondations<br>Agressivité sur les bétons | Niveau d'eau<br>Salinité            | Augmentation de l'enrobage (pour inclusions rigides en béton armé)<br>Protection extérieure contre la corrosion<br>Utilisation de ciments prise mer |
| Vent                                 | Sans objet   | -  | -                                   | -   |
| Incendie                             | Dessiccation des sols<br>Fortes températures                     | Endommagement des éléments métalliques (ex. inclusions rigides)  |                                     |   |