

Ouvrages existants exposés à la sécheresse : stabilisation des sols de fondations par Imperméabilisation périmétrale

RECOMMANDATIONS SUR LA CONCEPTION ET LA MISE EN ŒUVRE

un document élaboré par :

Daniel LE BOULICAUT (SOGEO EXPERT – USG) – Coordonnateur du Groupe de travail

Luis CARPINTEIRO (SOCOTEC puis GINGER CEBTP)

François ESTRADÉ (Compagnie des Experts)

Jean-Louis GUILLOTEAU (SOCABAT)

Catherine JACQUARD (FONDASOL – USG)

Myriam LUCAS (SOCABAT)

Jacques SAINTOT (AFAG/ASQUAL/ECE)

Avec les participations de :

Jean-Michel JAVOUHEY (SARETEC) & **Éric PETITPAS** (MRN)

Groupe de relecture :

Nathalie TOUZE (CFG), **Pierre LEBON** (ASQUAL), **Fabrice EMERIAULT** (CFMS),

Marc FAVRE (CFMS) & **Cyril CHAPUY** (USG)

AVANT-PROPOS

Il y a maintenant plus de 30 ans que les premiers arrêtés relatifs à l'état de « Catastrophe Naturelle Sécheresse » ont été pris. Depuis cette date, il ne s'est pas passé une année sans que cet état de catastrophe naturelle ne soit reconnu sur le territoire français.

Le bilan établi en 2021 par la Fédération Française de l'Assurance concernant les sinistres générés par les mouvements de terrains induits par des phénomènes de retraits et gonflements des argiles sous l'effet de la sécheresse et de la réhydratation des sols est le suivant : 748 000 sinistres déclarés à fin 2018, à raison d'environ 20 000 sinistres par an entre 1989 et 2015 et plus de 45 000 sinistres par an entre 2016 et 2020.

L'estimation du coût de ces sinistres - encore provisoire à fin 2020 - s'élève à environ 14 Milliards d'euros, dont plus de 5 Milliards d'euros pour les années 2016 à 2020. A la fin 2019, 31 % des indemnités catastrophes naturelles (paiements et provisions) versées depuis 1982 concernent des sinistres sécheresse. Le risque lié au retrait / gonflement des argiles (RGA) constitue donc un risque majeur en raison de l'ampleur des dégâts qu'il provoque.

Il est à craindre que l'accélération du phénomène de sécheresse observée depuis 2015 ne se confirme, voire ne s'amplifie du fait de l'impact croissant du changement climatique. D'autre part, la nouvelle carte d'exposition du territoire aux sols argileux sensibles résultant de l'amélioration de la connaissance permet d'identifier de nouvelles zones exposées à cet aléa. Si la susceptibilité moyenne ou forte au retrait-gonflement d'argiles concernait 24 % du territoire métropolitain avant 2019, ce degré d'exposition représente désormais 48 % (source : BRGM, 2019). Le nombre de maisons individuelles exposées est maintenant estimé à 10,5 millions.

Comment, à partir de ce constat, traiter les conséquences du phénomène sur les pavillons individuels et autres ouvrages légers ?

Il convient tout d'abord de souligner que les constructions correctement conçues en termes, notamment, de structures et fondations sont peu affectées par les phénomènes de retrait/gonflement. Mais tel n'est pas notre sujet dans le travail présenté ci-après.

Aujourd'hui, la grande majorité des réparations des sinistres Cat-Nat sécheresse sont traités par intervention sur les ouvrages eux-mêmes, c'est-à-dire par réparation et/ou renforcement des superstructures (chaînages) et/ou reprises en sous-œuvre, totales ou partielles, par micropieux ou puits, voire injections, sous les dallages notamment.

La méthode objet du présent document répond à une philosophie géotechnique différente, à savoir intervenir sur la cause essentielle du désordre, le sol lui-même et sa sensibilité à l'eau, en faisant en sorte de stabiliser les sols de fondation de l'ouvrage en termes de teneur en eau, tout en renforçant éventuellement les superstructures, si nécessaire.

Cette méthode de « Stabilisation des sols de fondation par imperméabilisation périmétrale » est préconisée depuis longtemps par certains bureaux d'études, et a été mise en œuvre avec succès sur plusieurs centaines de dossiers. Toutefois, son développement s'est heurté à plusieurs phénomènes ou a priori : la frilosité des victimes de ces dommages qui voient dans des interventions « lourdes » un gage de sérieux et d'efficacité (alors même que les sinistres de deuxième génération sont plus fréquents avec ces méthodologies dites lourdes), l'absence de règles professionnelles établies auxquelles les entreprises et les bureaux d'études peuvent se référer et, par conséquent, le refus de certaines compagnies d'assurance d'indemniser des solutions de réparation en l'absence de référentiel technique.

Pourtant cette méthode, en termes de coûts, est de l'ordre de 2 à 3 fois plus économique, à désordre comparable, que les techniques de reprises en sous-œuvre. Elle peut également être mise en œuvre pour des ouvrages existants non endommagés dont le diagnostic structurel et l'exposition à l'aléa sol argileux recommanderaient des actions de prévention.

L'objectif du présent document est en priorité de pallier ce manque de règles, tant en termes d'études préalables que de réalisation mais également, pourquoi pas, de faire prendre conscience aux constructeurs, de l'importance d'étudier avant toute construction l'environnement global d'un projet en termes de végétation, de géomorphologie et de circulation des eaux.

Rappelons que la prévention reste toujours la méthode la plus efficace pour limiter les sinistres.

Daniel LE BOULICAUT

SOMMAIRE

1. CHAPITRE 1 : DOMAINE D'APPLICATION	1
1.1. PRÉAMBULE.....	1
1.2. DOMAINE D'UTILISATION DE LA MÉTHODE	1
1.2.1. Principes généraux.....	2
1.2.2. En termes de structures et de conception de l'ouvrage.....	3
1.2.3. En termes de dommages sur l'ouvrage.....	3
1.2.4. En termes de contexte géologique	4
1.2.5. En termes de contexte environnemental	6
2. CHAPITRE 2 : ÉTUDES PRÉALABLES.....	7
2.1. DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'OUVRAGE	7
2.2. DESCRIPTION ET ANALYSE DES DÉSDORDRES.....	7
2.3. DIAGNOSTIC DES STRUCTURES DE L'OUVRAGE ET DES RÉSEAUX	9
2.3.1. Diagnostic structure	9
2.3.2. Localisation et état d'étanchéité des réseaux et autres ouvrages enterrés	10
2.4. DIAGNOSTIC DE L'ENVIRONNEMENT GÉNÉRAL.....	10
2.5. DIAGNOSTIC DES SOLS DE FONDATION (MISSION G5)	12
2.5.1. But de la mission	12
2.5.2. Types d'investigations à mettre en œuvre	13
2.6. DIAGNOSTIC DES SOLS DE FONDATION (MISSION G5)	12
3. CHAPITRE 3 : CONCEPTION.....	15
3.1. ÉTUDE DE CONCEPTION	15
3.2. MATÉRIAUX	15
3.2.1. Membranes.....	15
3.2.2. Géotextiles.....	16
3.2.3. Drains	17
3.2.4. Matériau support des membranes anti-évaporation (MAE).....	17
3.2.5. Béton	17
3.3. COMPOSITION DES DISPOSITIFS	17
3.3.1. Les membranes anti-évaporation (MAE).....	17
3.3.2. Les écrans anti-racines (EAR).....	19
3.3.3. Les dispositifs de confinement (DCG)	20
3.3.4. Cas des terrains en pente.....	20
3.4. CHOIX ET ORGANISATION DES DISPOSITIFS	21
3.4.1. Les membranes anti-évaporation (MAE)	21
3.4.2. Les écrans anti-racines (EAR).....	22
3.4.3. Les écrans de confinement (EC).....	23

SOMMAIRE

4. CHAPITRE 4 : MISE EN ŒUVRE	24
4.1. ÉTUDE DE RÉALISATION	24
4.2. MISE EN ŒUVRE	25
4.2.1. Prescriptions concernant le support	25
4.2.2. Prescriptions concernant les tranchées	25
4.2.3. Conditionnement et étiquetage des géomembranes	25
4.2.4. Transport, stockage et manutention.....	26
4.2.6. Mise en œuvre de la membrane	26
4.2.7. Raccordements aux ouvrages annexes	28
5. CHAPITRE 5 : SUIVI D'EXÉCUTION – CONTRÔLE	29
5.1. GÉNÉRALITÉS	29
5.2. DOSSIER DE RECOLEMENT	31
5.3. SURVEILLANCE ET ENTRETIEN DES OUVRAGES	31
ANNEXES.....	32
ANNEXE 1 : RÉFÉRENCES.....	32
ANNEXE 2 : DÉFINITIONS ET PRINCIPES	34
A2-1 - Définitions et principes relatifs au sol.....	34
A2-2- Définitions relatives au bâtiment	34
A2-3- Définitions relatives à l'environnement	35
A2-4- Choix des matériaux géosynthétiques :	37
ANNEXE 3 : RETRAIT/GONFLEMENT	38
ANNEXE 4 : Commentaires et compléments à la Norme NF P 94-500 concernant les systèmes de stabilisation par membranes des ouvrages exposés à la sécheresse.	41
A4-1- Dignostic	41
A4-2- Mission d'ingénierie de conception des systèmes de membranes des ouvrages exposés à la sécheresse.....	46
A4-3- Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3).....	49
A4-4- Supervision du suivi géotechnique d'exécution (G4)	50

TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Membrane anti-évaporation "drainée".....	18
Figure 2 - Écrans anti-racines.....	19
Figure 3 - Écrans – cas des terrains en pente	21
Figure 4 - Écrans – choix et organisation des dispositifs	23
Figure 5 - Mise en œuvre de la membrane	27



DOMAINE D'APPLICATION

1.1. PRÉAMBULE

La technique de stabilisation des sols de fondation par imperméabilisation périmétrale à l'aide de « géomembranes » est destinée à stabiliser les structures maçonnées des maisons individuelles à 1 ou 2 niveaux dont les fondations ont été affectées par un phénomène de « retrait-gonflement » des sols argileux. Ce phénomène est provoqué par des variations hydriques liées à des phénomènes climatiques saisonniers et identifiées comme facteur causal prépondérant par le diagnostic géotechnique.

La technique s'applique aussi aux ouvrages existants non sinistrés à titre préventif **et ne se substitue pas aux dispositions à prendre dans la conception et la réalisation d'ouvrages neufs.**

En règle générale, la membrane ne constitue pas, à elle seule, une solution de réparation des dommages provoqués par la sécheresse. Elle est notamment associée à des travaux de rigidification éventuels de la structure (longrines en soubassement, chaînages et raidisseurs complémentaires, injections de la forme sous dallage ...) à définir après diagnostic, de traitement des fissures et d'imperméabilisation des façades.

Le présent document a pour objet de définir les conditions dans lesquelles cette méthode peut être préconisée, tant au niveau de l'ouvrage existant que de son environnement géotechnique, ainsi que les différentes études et missions à réaliser pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle de sa mise en œuvre.

La description des différents phénomènes liés à la sécheresse et au comportement des sols argileux sont décrits en annexe A2.1, tandis que les notions relatives à la construction sont décrites en annexe A2.2.

Un diagnostic préalable doit conclure favorablement à l'utilisation de la technique par membrane.

1.2. DOMAINE D'UTILISATION DE LA MÉTHODE

1.2.1. Principes généraux

Les dommages « sécheresse » sont dus à des variations de teneur en eau, lesquelles viennent perturber des sols sensibles qui supportent des ouvrages et conduisent à des mouvements de structures inacceptables (cf. Rapport de synthèse et guides ARGIC 2017).

Le domaine d'utilisation de la méthode peut être abordé en termes de risque.

En effet, la maîtrise du comportement de l'ouvrage est tributaire de trois facteurs concomitants :

- Les sols de fondations,
- Les structures de l'ouvrage,
- Les variations de la teneur en eau des sols.

Cela signifie qu'un sol peu sensible peut conduire à des désordres importants si les variations de teneur en eau sont importantes et si la structure de l'ouvrage est inadaptée aux mouvements engendrés.

À contrario, un sol très sensible peut ne présenter aucun retrait ni gonflement et ne provoquer aucun désordre si les variations de teneur en eau sont peu importantes et/ou les structures du bâtiment suffisamment rigides pour accepter quelques mouvements de fondation, ou si le sol est maintenu à une teneur en eau constante, quelles que soient les conditions climatiques.

Le but des dispositifs d'imperméabilisation par géomembranes (MAE : Membranes anti-évaporation - DCG et DCP : Dispositifs de confinement global ou Partiel – EAR : Ecran Anti-Racines) est justement de faire en sorte de limiter, voire de supprimer les variations de teneur en eau sous les fondations, et la technique devra être d'autant plus efficace, et donc correctement étudiée et mise en œuvre que les sols seront sensibles à ces variations.

La méthode de stabilisation des sols de fondation par membrane n'est applicable que **si les désordres peuvent être formellement imputés de manière prépondérante à ces phénomènes** et si les conditions, en termes de géométrie des fondations (encastrement, niveau d'assise) et d'environnement le permettent.

Le diagnostic peut s'avérer difficile en cas de bâtiments trop récents pour pouvoir affirmer que les désordres ne traduisent pas une autre pathologie de leurs fondations. De ce point de vue, un délai de l'ordre de 5 ans entre l'achèvement de la construction et l'apparition des premiers désordres semble constituer un minimum.

Les présentes recommandations ne traitent pas des adaptations nécessaires à l'association avec la technique qui consiste à mettre en œuvre un système de réhumidification contrôlée du sol, concomitamment à la pose de la membrane, de façon à accélérer la stabilisation du phénomène de retrait et de regonflement (cf. voir guides MACH et UNEP).

1.2.2. En termes de structures et de conception de l'ouvrage

Sont concernés par ces techniques de protection et/ou de re-stabilisation de leurs fondations, les maisons individuelles et autres bâtiments « légers » (à un ou deux niveaux), dont le gros-œuvre est en maçonnerie (agglomérés de ciment, briques de terre cuite, moellons, pierres de taille, etc.).

Sont également concernés **les bâtiments anciens** dont les murs en maçonnerie épaisse de moellons sont dépourvus de semelles de fondation ainsi que de chaînages horizontaux et verticaux (« raidisseurs ») en béton.

En effet, pour ces bâtiments à faible rigidité structurelle, les membranes constituent souvent la seule solution « raisonnable », au plan technico-économique dans la mesure où ce type de structure peut admettre de légers mouvements résiduels.

En tout état de cause, la décision de mise en œuvre de cette technique ne peut être prise qu'après qu'un diagnostic structure ait été établi, cette solution devant le plus souvent être associée à une rigidification des structures de l'ouvrage concerné.

Pour les bâtiments dont la base des fondations est située à plus de 1,5 m de profondeur, les dispositifs d'imperméabilisation sont en principe inutiles (sauf cas particuliers) ; les désordres, s'ils sont bien imputables à la sécheresse, sont le plus souvent provoqués par la végétation, qui doit être neutralisée (par destruction ou écran anti-racines), mais également par un drainage naturel des sols favorisé par des niveaux plus perméables situés sous les fondations, et parfois de faible épaisseur.

Les bâtiments comportant plusieurs profondeurs de fondations et/ou de nature différente (plusieurs phases de construction par exemple) ou comportant des niveaux décalés doivent faire l'objet d'une étude particulière de faisabilité tenant compte, notamment, de la localisation des désordres, de la proximité ou non de végétaux, de la pente éventuelle du terrain, etc.

Sauf étude particulière favorable, les dispositifs anti-évaporation ne doivent être retenus (lorsque le phénomène « évaporation » est au moins partiellement à l'origine des désordres), que s'ils peuvent être réalisés sur tout le périmètre des bâtiments sinistrés.

1.2.3. En termes de dommages sur l'ouvrage

En l'état actuel des connaissances, la gravité des désordres ne constitue pas une limitation à l'emploi de la technique.

Cependant, l'appréciation du risque technique sur le principe du mode réparatoire sera fonction des conclusions du rapport géotechnique et du diagnostic structure réalisés.

1.2.4. En termes de contexte géologique

1.2.4.1. Contexte stratigraphique

De quels sols parle-t-on ?

De tous les sols où ont pu être observés des désordres liés à la sécheresse et, parmi les plus fréquemment rencontrés (sans que cet inventaire soit limitatif) :

- Altérations argileuses des substrats carbonatés : calcaires, tuffeaux, marnes,
- Altérations argileuses des substrats magmatiques ou métamorphiques aluminosilicatés,
- Sols alluvionnaires à dominante argileuse,
- Sols à dominante argileuse en général dont les formations sédimentaires (argiles vertes, marnes, molasses, argiles des Flandres) constituent la plus grande part.

Les contextes géologiques de nature hétérogène (formations lenticulaires – intercalations sablo-argileuses de Sologne par exemple) sont a priori, et sauf étude géotechnique très détaillée, peu ou pas adaptés à la méthode.

Pour les sols sous consolidés, ou riches en matière organique (tourbe) à l'origine de nombreux désordres, la technique de stabilisation des sols par membrane n'est pas adaptée.

1.2.4.2. Nature minéralogique et granulométrique

Sur la base des essais d'identifications « classiques » utilisés en géotechnique (NF P94-049, NF P94-068, NF EN ISO 17 892-4, NF EN ISO 17 892-12 à la date de rédaction du présent document), il est généralement admis que les sols sont sensibles aux variations hydriques, et présentent un aléa vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement, dès lors que la proportion d'argile (C2 : passant à 2µm) contenue dans le sol est supérieure à 20 % et que l'une des conditions suivantes est satisfaite :

- Le sol est situé au-dessus de la droite de Casagrande ($IP = 0.73(WL-20)$) dans le diagramme de plasticité WL/IP, et $IP > 25$ ou si $WL > 40$
- La valeur de bleu VBS est supérieure à 6 : $VBS > 6$

Cela correspond aux sols décrits comme argiles de plasticité moyenne, élevée à très élevée selon la norme NF EN ISO 14 688-2.

Il peut aussi être utilisé les paramètres calculés à partir du C2 et de la valeur de bleu VBS :

$ACB = VBS/C2 \times 100$: activité de la fraction argileuse (voir XP P 94-011, Lautrin)

ACB	Activité des argiles (Lautrin)	Activité de la fraction argileuse (XP P94-011)
> 18	Nocives	TRÈS ACTIVE
13 à 18	Très actives	ACTIVE
8 à 13	Actives	MOYENNE
5 à 8	Normales	
3 à 5	Peu actives	PEU ACTIVE
1 à 3	Argiles inactives	INACTIVE
<1	Sols non argileux	

En présence d'argiles nocives ou très actives (ACB >13), les sols sont a priori sensibles au retrait-gonflement.

Il sera également possible de se référer, pour évaluer la sensibilité du terrain sous une construction, au tableau ci-après du Guide 1 élaboré par l'IFFSTAR sur le retrait et gonflement des argiles.

Sol	W_L	<35	35 à 45	45 à 70	>70
	I_p	<10	10 à 20	20 à 40	>40
	V_{BS}	<1,5	1,5 à 4	4 à 12	>12
	A_C	<20	20 à 50	50 à 100	>100
	A_{CB}	<3	3 à 8	8 à 13	>13
Epaisseur (en m)	0,5 à 1,5	Terrain pas ou peu sensible		Terrain sensible	
	1,5 à 3	Terrain pas ou peu sensible		Terrain sensible à très sensible	
	>3	Terrain pas ou peu sensible		Terrain sensible à très sensible	

Dans tous les cas, la sensibilité des sols devra être appréciée sur la base du comportement des sols et des essais mécaniques de laboratoire effectués par le géotechnicien.

Pour de sols constitués d'argiles nocives ou très actives, le traitement par imperméabilisation périmétrale nécessite une analyse approfondie et une attention particulière du géotechnicien (contexte lithologique et environnement homogènes par exemple, confinement complet, phasage des travaux en fonction des paramètres d'état...) et des essais complémentaires sur échantillons intacts (XP 94-060-2, XP 94-091, NF EN ISO 17 892-2).

1.2.5. En termes de contexte environnemental

1.2.5.1. Contexte réglementaire/administratif

Le principe de la méthode suppose une accessibilité périphérique, cette accessibilité n'étant grevée d'aucune servitude ; sont donc directement exclues a priori les constructions situées en limite de propriété et mitoyennes.

1.2.5.1. Contexte géomorphologique

Les études préalables devront s'intéresser à l'historique de la construction au regard de la géomorphologie du site : Mouvements de sols importants, déblais/remblais, création ou suppressions de points d'eau....

Les ouvrages situés dans des zones géomorphologiques hétérogènes (cuvette, thalweg, en relief, en forte déclivité,) doivent faire l'objet d'une étude particulière quant à la collecte et l'évacuation des eaux de ruissellement.

De plus, la géomorphologie peut engendrer des circulations d'eaux souterraines même temporaires, aux interfaces limons de couverture/argiles d'altération ou argiles d'altération/substratum qui constituent en principe une **contre-indication à la méthode**, sauf à ce que ces eaux puissent être drainées et/ou déviées en amont des bâtiments à traiter.

1.2.5.2. Végétation

Conformément aux dispositions du PPRS-type (Plan de Prévention contre le Risque « Sécheresse »), tout arbre ou arbuste distant du bâtiment de moins de sa hauteur à maturité doit être neutralisé, soit par abattage, soit par interposition d'un écran anti-racines ; cette distance est majorée de 50 % en cas de ligne d'arbres ou de haie parallèle à une façade (cf. Guides ARGIC 2017).

1.2.4.5.3 Sismicité

Ce critère n'est pas à prendre en considération, le comportement des bâtiments vis-à-vis du séisme étant réputé non modifié par les dispositifs faisant l'objet de ce document.

1.2.5.4. Termites

À priori pas d'interaction, entre les systèmes de traitement anti-termites et la membrane.

Attention : Le film anti-termites n'a pas de fonction d'imperméabilité et ne peut donc pas se substituer à la membrane.

Les études préalables consistent à réaliser un diagnostic sur l'ensemble « structure / sol / environnement ».

2.1. DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'OUVRAGE

Les points suivants devront impérativement être renseignés au stade du diagnostic :

- Type d'ouvrage : Pavillon, ouvrage d'habitation collectif, immeuble de bureaux, bâtiment industriel,
- Type de construction : Traditionnel en moellons, parpaings, mixte, avec ou sans ajouts successifs,
- Présence de sous-sols,
- Nature du niveau bas : dallage, plancher porté,
- Date ou période de construction (essayer de savoir, si l'ouvrage est relativement récent, la saison de construction),
- Degré de maintenance, vétusté.

2.2. DESCRIPTION ET ANALYSE DES DESORDRES

Dans le cas d'ouvrage endommagé, l'objectif essentiel de ce diagnostic est la caractérisation des mouvements de sol à l'origine des désordres. Le pourquoi des mouvements observés, et donc du sinistre, se situe dans le sol, dans l'environnement, voire dans l'ouvrage, et parfois dans les trois, et l'on ne peut prétendre proposer une solution de réparation qu'après avoir répondu à cette question.

Les points suivants devront faire l'objet d'un relevé exhaustif et précis en termes de géométrie et de description (caractère manifestement évolutif ou non des fissures par exemple et amplitude) :

- **Types de désordres et importance :**

- Structurellement

- Fissures sur ouvrages verticaux, avec ou sans désaffleurements,
 - Fissures sur planchers, dallages ou plafond,
 - Désolidarisations planchers ou dallages / contre-cloisons ou cloisons,
 - Décollements plinthes ou revêtements muraux (carrelage, faïence, revêtements),
 - Fissures en superstructure exclusivement,
 - Fissures sur ossature et soubassements,
 - Rupture des fondations,
 - Rotation des fondations et soubassements,
 - Basculement ou torsion de l'ensemble ou d'une partie du bâtiment,
 - Affaissement/Soulèvement de dallage ou désordres du plancher sur vide sanitaire.

- Second Œuvre

- Blocage d'ouverture des portes et fenêtres,
 - Fissuration cloison doublage ou distribution,
 - Mise en compression des cloisons ou soulèvement des faux plafonds,
 - Fuites sur réseaux enterrés ou encastrés,
 - ...

- **Répartition :**

- Décrire les positions, inclinaisons et ouvertures des fissures

- **Evolutivité :**

Il peut s'avérer nécessaire de mettre l'ouvrage en observation dans des cas particuliers. Ce suivi intéresse :

- La structure : Pose de témoins, relevés périodiques de ces témoins, du nombre et de la morphologie des désordres,
 - Le contexte hydrogéologique : Pose de piézomètres avec suivi

2.3. DIAGNOSTIC DES STRUCTURES DE L'OUVRAGE ET DES RÉSEAUX

2.3.1. Diagnostic structure

Ce diagnostic doit être réalisé par des intervenants spécialisés dans ce domaine.

Connaissance de la structure :

Il convient de modéliser la structure existante et de mettre en évidence les matériaux qui la composent ; il est primordial que les rapports fournissent, en nombre suffisant, les croquis qui explicitent le détail de ces dispositions constructives. Ces documents seront étudiés en cohérence avec les représentations des dommages observés pouvant ainsi permettre de définir leur origine la plus probable : désorganisation ou basculement de la structure porteuse soit par retrait, soit par gonflement ou autre phénomène (reptation, etc.) des sols argileux.

Rigidité de la structure :

Ce point est primordial vis-à-vis des tassements différentiels dans un terrain hétérogène de compressibilité variable d'un point à l'autre de la construction. D'une façon générale, le diagnostic devra permettre d'appréhender le niveau de rigidité des structures existantes.

L'analyse devra également porter sur les parties de bâtiment fondées différemment ou ancrées dans des horizons hétérogènes (sous-sol partiel, niveau de fondations décalé, déblais/remblais, etc..) susceptibles d'être soumises à des tassements différentiels ; le diagnostic confirmera la nécessité de désolidariser et séparer les différentes parties par un joint de rupture sur toute la hauteur de la construction.

Les investigations permettront de vérifier qu'il n'y a pas d'anomalies majeures sur les ouvrages de fondation et que ceux-ci respectent les normes en vigueur lors de la construction (semelles filantes continues, armées et bétonnées à pleine fouille par exemple), selon les préconisations des normes en vigueur au moment de la construction (DTU 13-12 « Règles pour le calcul des fondations superficielles » et norme NF P 94-261 « dimensionnement des fondations superficielles », en complément de l'Eurocode 7). Dans l'hypothèse de système de fondations mixtes (par semelles filantes et isolées), une justification des tassements différentiels sera également impérative dans le cadre du diagnostic géotechnique.

Le diagnostic devra préciser si les murs porteurs comportent ou non un dispositif de chaînage horizontal et vertical liaisonné. Des investigations destructives ou non devront confirmer la continuité des ferrailages et des recouvrements des armatures de chaînage au niveau des nœuds pour chaque plancher ainsi qu'au couronnement des murs.

Dans l'hypothèse d'un dallage sur terre-plein, les investigations devront permettre de vérifier sa géométrie en termes d'épaisseur, son ferrailage et la liaison éventuelle avec la structure.

Ce diagnostic constitue le point d'arrêt n°1 de la faisabilité de la méthode

Critères d'exclusion : niveaux décalés, règles d'urbanisme

Le diagnostic structure devra conclure quant à la nécessité de conforter cette dernière. On étudiera les dispositifs de confortement nécessaires à partir de la typologie et de la gravité des dommages observés.

2.3.2. Diagnostic, localisation et état d'étanchéité des réseaux et autres ouvrages enterrés

L'expertise devra également renseigner les points suivants :

Localisation et étanchéité des réseaux EU – EV – EP situés sous la construction et dans l'emprise immédiate de la construction :

- Localisation des tranchées techniques réservées aux réseaux d'alimentation (eau, gaz, électricité, courants faibles, etc...),
- Présence de tranchée drainante (terrain en déclivité) et fonctionnement,
- Présence de fosse septique ou toutes-eaux, réserve d'eau, etc. enterrée sur la parcelle et état d'étanchéité,
- Puits canadiens à proximité de l'ouvrage. Ce type d'installation peut être de nature à perturber les circulations d'eau dans les sols environnants et donc constituer une cause potentielle de sinistre et une contre-indication au recours à la membrane,
- Autres ouvrages (implantation des capteurs géothermiques notamment...).

2.4. DIAGNOSTIC DE L'ENVIRONNEMENT GÉNÉRAL

Ce diagnostic portera notamment sur :

Un relevé exhaustif de la végétation et de son positionnement par rapport à l'ouvrage :

- **Pour les arbres et arbustes :**
 - Essence des arbres,
 - Position (isolée, haie arbustive...),
 - Age (estimé ou selon les informations collectées),
 - Distance et orientation par rapport à l'ouvrage sinistré (relevé sur plan coté nécessaire).

- **Autre type de végétation :**
 - Mise en évidence de végétation à caractère hydrophile ou non.

Une enquête sur les avoisinants :

- Présence ou non de bâtiments présentant des pathologies similaires dans un périmètre proche,
- Présence d'ouvrages pouvant avoir une incidence sur la circulation des eaux au niveau de l'ouvrage étudié.

Un examen des aménagements extérieurs et un relevé des ouvrages pouvant impacter l'état hydrique des sols, par exemple :

- Terrasses ou ouvrages maçonnés,
- Murs de soutènements,
- Fossés,
- Talus...

Il conviendra également de s'assurer que des arrivées d'eaux accidentelles, naturelles ou anthropiques, ne soient pas à l'origine ou ne participent pas aux variations hydriques constatées, en tant qu'élément aggravant, voire déterminant. Une enquête sérieuse devra donc être menée, qui comportera notamment, en cas de doute :

- Examen des réseaux existants dans le secteur sinistré, avec mise en charge éventuelle, voire caméra,
- Examen des fourreaux (électriques, fibre, alimentation en eau...) et de leur non implication dans d'éventuelles venues d'eau.
- Si présence de drains, vérification des exutoires
- Réalisation de profils hydriques complémentaires dans et aux abords de la zone suspecte.

2.5. DIAGNOSTIC DES SOLS DE FONDATION (MISSION G5)

2.5.1. But de la mission géotechnique G5 selon la norme NF P94500

Il ne faut surtout pas perdre de vue que le rôle du dispositif est de maintenir sur un volume de sol donné, une teneur en eau relativement constante, de façon à ce que les variations volumétriques de ce sol soient et demeurent compatibles avec les déformations admissibles par l'ouvrage.

De ce fait, cette mission a pour but :

- D'apprécier si la sécheresse peut être identifiée comme une des causes des désordres,
- D'estimer le caractère évolutif ou non des sols d'assise, et sur quelle profondeur,
- De mesurer l'amplitude de variation volumique de ces sols en deçà et au-delà de leur teneur en eau d'équilibre (celle qui est mesurée comme restant relativement constante au-delà d'une certaine profondeur, à définir),
- De situer l'état des sols argileux au moment de l'intervention, par rapport à leurs potentiels de retrait-gonflement, au niveau de l'assise des fondations.
- De se prononcer sur la possibilité de mise en œuvre d'un système de stabilisation des sols d'assise par un système d'imperméabilisation par géomembrane périmétrale.

Cette mission s'appuie sur des investigations géotechniques spécifiques et sur un examen systématique de points dont la liste suivante n'est pas exhaustive :

- Contexte géotechnique global de la zone (Cartes existantes – classements CAT-NAT),
- Contexte géologique : Carte géologique, archives, expérience,
- Cartes existantes liées à ces phénomènes : www.argiles.fr,
- Existence d'études géotechniques sur le site ou à proximité,
- Position géomorphologique de l'ouvrage sinistré : terrain plat, en pente, en thalweg, en relief, ...
- Nature prévisible des sols de fondation en fonction des observations locales,
- Eléments extérieurs pouvant avoir une incidence : réseaux en général, constructions mitoyennes...

2.5.2. Types d'investigations à mettre en œuvre

La campagne d'investigations sur site peut être menée indifféremment **en une ou deux interventions**. Cette campagne devra permettre de vérifier les hypothèses qui se présentent pour expliquer la localisation des désordres et leur nature : hétérogénéité des sols, effets de la végétation, drainage naturel...

Un point d'arrêt peut être envisagé à l'issue des investigations sur site et/ou des essais d'identification, s'il s'avère que l'hétérogénéité du contexte lithologique ou la nature des sols rend l'efficacité de la membrane très aléatoire à long terme.

La campagne d'investigations sur site et en laboratoire comprendra **à minima** les éléments suivants. Au droit des parties sinistrées, et au droit des parties non sinistrées :

- Reconnaissance manuelle ou à la mini pelle des fondations en deux ou trois points. Une attention particulière devra être apportée au rebouchage et au compactage des sols dans les fouilles, afin de ne pas créer de point d'infiltration d'eau préférentiel,
- Prélèvements à la base des fondations, avec si possible un échantillon intact sous la fondation,
- Au minimum 2 sondages à la tarière de 5m minimum : Un en zone sinistrée, un en zone non sinistrée, avec prélèvements d'échantillons remaniés (tous les 0,5 m), si possible à proximité des investigations précédentes.

Pour ces deux derniers points, une attention particulière est à apporter à l'examen des traces éventuelles d'hydromorphie.

Essais d'identification et propriétés physiques :

- Teneurs en eau, aboutissant à l'établissement de 2 profils hydriques à mettre en regard avec la lithologie observée dans les sondages. L'attention est attirée sur la période à laquelle sont établis ces profils : ils ne sont pas nécessairement significatifs en période humide. Il est donc préconisé de réaliser ces profils plutôt en période estivale et, dans tous les cas, de noter le contexte climatique à l'époque des prélèvements.
- Identifications type granulométrie, sédimentométrie, limites d'Atterberg et/ou valeur au bleu.

Essais de laboratoire **sur échantillons intacts** permettant de caractériser les paramètres mécaniques et d'état du sol :

- Essai(s) de retrait linéaire permettant de mesurer son potentiel de retrait (Essai de dessiccation, norme XP P 94-060-2)
- Essai de gonflement à l'œdomètre (norme XP P94-091)

Pour la description de ces essais, on se reportera à l'annexe 3.

2.6. ANALYSE ET SYNTHÈSE

Cette synthèse s'appuie donc sur :

- Le diagnostic géotechnique, (cf. 2.5.1)
- Le diagnostic des structures de l'ouvrage, (cf. 2.3.1),
- Le diagnostic des réseaux, (cf. 2.3.2),
- Le diagnostic environnemental, (cf. 2.4),

L'analyse de ces premiers résultats constitue le point d'arrêt n°2 de la faisabilité de la méthode.

Critère d'exclusion : profil lithologique susceptible de remettre en cause le fonctionnement de la membrane (exemples : sols sableux et graveleux ; forte hétérogénéité lithologique).

Si la méthode reste, à ce stade, toujours envisageable, cette synthèse devra être complétée par une étude de projet qui pourra nécessiter des compléments d'investigations.

3.1. ÉTUDE DE CONCEPTION

S'agissant de réparations de maisons individuelles ou d'ouvrages simples, il a été pris le parti dans ce document de regrouper les phases « avant-projet » et « projet », et donc de réaliser une étude de conception globale, à partir de la synthèse précédente.

Cette étude de conception globale peut nécessiter l'intervention de plusieurs bureaux d'études spécialisés et comporte une mission d'ingénierie géotechnique G2.

La méthodologie de cette mission est reportée en annexe A4.2 sous forme de tableaux.

3.2. CHOIX DES MATÉRIAUX

3.2.1. Membranes

Dans le cadre du présent document, et bien que cela ne soit pas leur fonction, les membranes utilisées sont des géomembranes (CFG, 2017 : N°10). Les définitions qui s'y rapportent sont données par la norme NF P 84-500. L'unique fonction des géomembranes est l'étanchéité. Les géomembranes sont (CFG, 2017) :

- Des produits minces (sont donc exclus les produits étanches constitués de mortier ou de mastics bitumineux d'épaisseurs centimétriques ou décimétriques),
- Des membranes dont l'épaisseur fonctionnelle est supérieure ou égale à 1 mm (sont donc exclus les géofilms dont l'épaisseur fonctionnelle est inférieure à 1 mm),
- Des produits souples (sont donc exclus une couche de mortier de ciment ou une tôle métallique),
- Des produits étanches : le niveau minimum d'étanchéité d'une géomembrane définissant la norme est de $10^{-5} \text{m}^3/\text{m}^2/\text{j}$,
- Des produits présentant une continuité entre eux par des assemblages étanches et ayant une bonne résistance (sont donc exclus tous les produits ne pouvant être assemblés thermiquement ou chimiquement).

Les géomembranes sont des produits manufacturés et transportés sur le site sous forme de lés de largeurs variables (à partir de 1,5 m) conditionnés en rouleaux ou en nappes (pré-assemblage en usine des lés) dont la surface peut atteindre 1 000 m² (ou plus).

Le choix du type de géomembrane sera fait en fonction de la spécificité de chaque projet en mettant à profit les avantages de chacune :

- Les PP(f), PVC et EPDM pour leur souplesse et la possibilité de préfabrication, évitant les soudures sur site.
- Le PEHD pour sa résistance mécanique, résistance aux rongeurs et aux racines,
- Les Géomembranes Bitumineuses pour leur résistance mécanique et leur simplicité d'assemblage,

À noter que la perméabilité des Géosynthétiques Bentonitiques est variable en fonction de leur teneur en eau ce qui exclut leur utilisation pour cet usage.

Toutes les géomembranes sont utilisables en écran anti-évaporation (MAE dans le présent document), sous réserve d'une épaisseur minimale de 1mm (pour les géomembranes bitumineuses : 3mm).

En écran anti-racines, l'épaisseur minimale sera portée à 2 mm (3 mm pour les bitumineuses).

3.2.2. Géotextiles

Un géotextile est défini par la norme NF EN ISO 10318-1 comme un matériau textile plan, perméable, à base de polymère (synthétique ou naturel) qui peut être non tissé, tricoté ou tissé. Les fonctions que les géotextiles peuvent remplir sont le drainage, la filtration, la protection, le renforcement, la séparation, et le contrôle de l'érosion de surface.

Dans le cadre des ouvrages cités dans ce document, les géotextiles anti poinçonnement seront des non tissés aiguilletés polypropylène dont la masse surfacique sera au moins égale à 300g/m².

Il existe de nombreux types de géocomposites de drainage (matériaux apparentés aux géotextiles, mais dont la définition ne correspond pas à celle d'un géotextile) qui seront choisis en fonction de leur capacité à évacuer le flux dans leur plan, suivant le gradient hydraulique et la pression verticale exercée par le remblai.

Les géomembranes, géotextiles et géocomposites drainants appartiennent à la famille des géosynthétiques dont les principaux termes sont définis dans la norme NF EN ISO 10318-1.

3.2.3. Drains

On utilisera du drain de type routier rigide, type C1 avec fil d'eau (à l'exclusion de tout drain de type agricole).

On veillera par ailleurs à individualiser totalement le réseau drain de tout réseau EP, afin d'éviter d'alimenter le réseau de drainage en cas de dysfonctionnement du réseau EP.

On privilégiera bien évidemment un écoulement gravitaire et un exutoire adapté doté d'un clapet anti-retour en cas de risque de mise en charge prévisible.

3.2.4. Matériau support des membranes anti-évaporation (MAE)

Le matériau destiné à la couche inférieure des membranes anti-évaporation (couches support ou couche drainante) doit avoir une granulométrie fine et étalée (type 2/6).

3.2.5. Béton

Certains types d'écrans anti-racines (EAR) nécessitent l'utilisation de béton dosé au minimum à 200 kg de ciment par m³.

3.3. COMPOSITION DES DISPOSITIFS

Plusieurs dispositifs sont possibles selon les facteurs environnementaux et en fonction de la gravité des désordres.

3.3.1. Les membranes anti-évaporation (MAE)

Les MAE sont des membranes horizontales servant à empêcher l'évaporation à la surface des sols et à limiter la réhydratation des sols en période pluvieuse.

Deux types de membranes anti-évaporation peuvent être envisagés :

- **Membrane Anti-Evaporation « drainée »**, constituée comme ci-après :
 - Profil transversal du fond de fouille rectiligne (avec pente vers l'extérieur – minimum 5cm/m), se terminant par une mini-tranchée,
 - Réglage du fond de forme pouvant nécessiter une couche de sable de réglage et si nécessaire un géotextile anti poinçonnement à la base, en interface avec le sol.

- La membrane sur une largeur minimale de 2,50m avec relevé assurant une étanchéité avec la structure (solin),

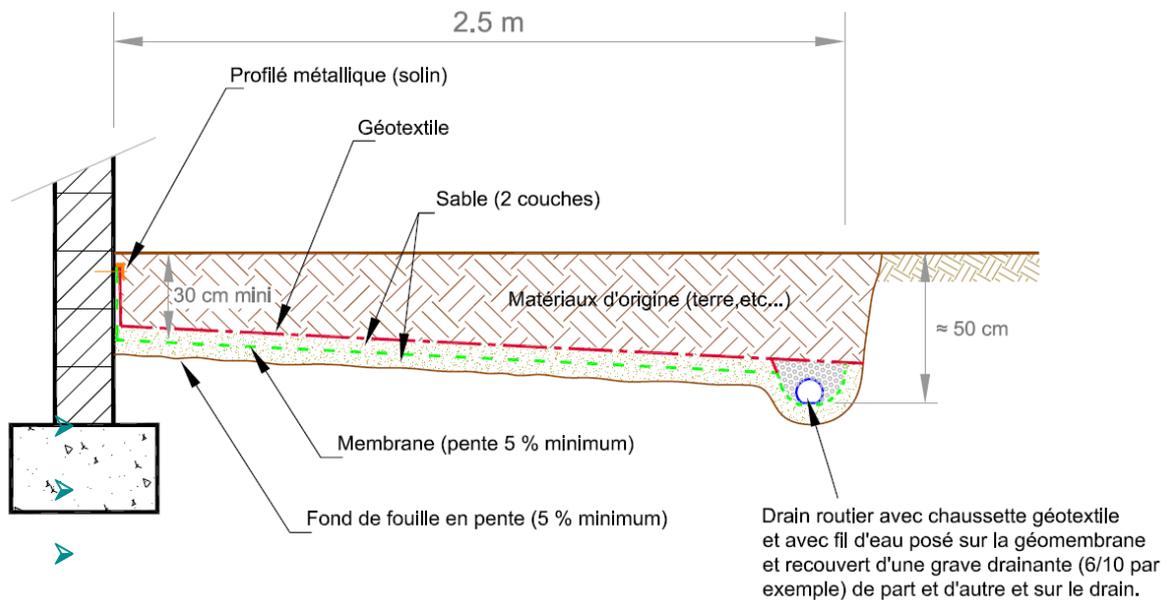


Figure 1 - Membrane anti-évaporation "drainée"

- Le système drainant constitué d'une couche de sable surmontée d'un géotextile anti contaminant ou tout autre dispositif équivalent,
- Le drain, en extrémité extérieure du dispositif, composé d'un drain avec chaussette géotextile avec fil d'eau reposant sur un lit de gravillons de réglage,
- La terre végétale ou le sol initial sur 30 cm minimum.

• **Membrane Anti-Evaporation « non drainée » - (Même dispositif que le précédent, mais sans le drain).**

Ce type de dispositif devra faire l'objet d'une étude particulière, la nécessité du drain étant fonction de la nature des sols au-dessous et au-dessus de la membrane, de leur sensibilité à l'eau, du contexte géomorphologique et de la largeur du dispositif.

3.3.2. Les écrans anti-racines (EAR)

Les Ecrans Anti Racines (EAR) sont des dispositifs tendant à empêcher les racines de se propager dans les sols supports de fondation des ouvrages, lorsqu'il est impossible de supprimer les végétaux en cause.

Ils sont constitués d'une tranchée étroite (à réaliser à l'aide d'un engin de terrassement muni d'un godet de 30 ou 40 cm de large), dans laquelle sera mis en place :

- Soit (type 1) uniquement un béton, compacté ou vibré, arrêté à 20-25 cm de la surface du sol,
- Soit (type 2) de part et d'autre de la fouille, une membrane entre 2 géotextiles anti-poinçonnement si nécessaire et un remblaiement de la tranchée soit par les matériaux excavés s'ils sont aptes à ce réemploi (ils doivent être aisément compactables, sans éléments grossiers) soit par un béton dans le cas contraire.

Pour des tranchées de profondeur supérieure à 1.3 m (EAR Type 1), on effectuera un remplissage de la tranchée en béton, du fait des difficultés de mise en œuvre, et notamment d'assemblage des membranes. Le remplissage avec les matériaux de la fouille ne sera possible que pour une profondeur inférieure à 1.3m et sous condition d'une bonne tenue des parois. Dans tous les cas, un blindage pourra s'avérer nécessaire.

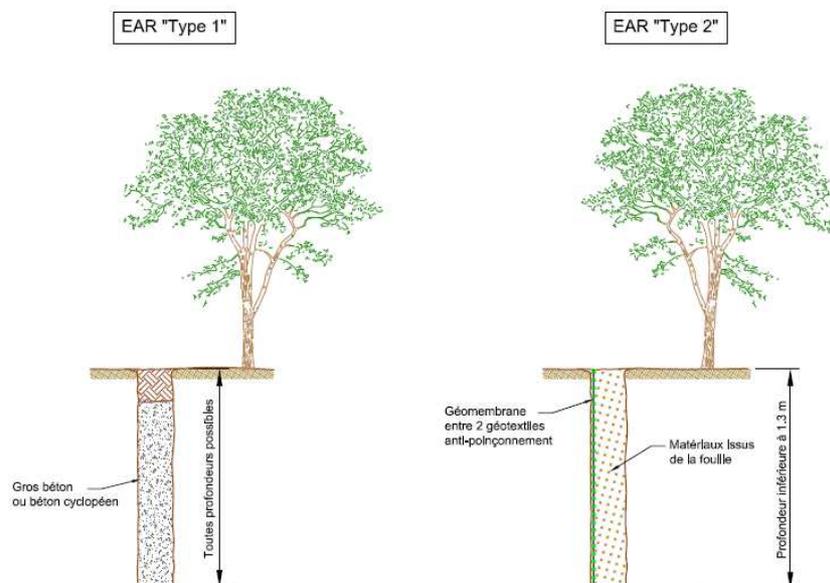


Figure 2a : écran anti-racine type 1

Figure 2b : écran anti-racine type 2

Figure 2 - Écrans anti-racines

NOTA IMPORTANT : Par définition, les écrans anti-racines (EAR) sont nécessairement isolés de la membrane anti-évaporation (MAE) et ne constituent pas leur prolongement vertical.

La profondeur à respecter est donnée par le tableau II du paragraphe 3.4.2.1

3.3.3. Les dispositifs de confinement global (DCG)

Il s'agit d'une membrane anti-évaporation prolongée verticalement par un écran de confinement (EC) pouvant éventuellement jouer le rôle d'écran anti-racine (EAR). La membrane est protégée si besoin le long de la paroi côté ouvrage par un géotextile anti-poinçonnement. Une MAE associée à un EAR constitue de fait un dispositif de confinement global (DCG).

Cette tranchée (EC ou EAR) peut être :

- Soit totalement remplie de béton, dans l'hypothèse où l'ouvrage ne fait pas obstacle à l'écoulement naturel des eaux,
- Soit remblayée (attention à la qualité du remblai qui doit être non agressif mécaniquement et relativement imperméable). Dans ce cas, il est disposé, le long de la paroi, côté membrane anti-évaporation, une membrane, qui peut être un prolongement de la membrane anti-évaporation (MAE), protégée par un dispositif anti-poinçonnement (si nécessaire).

3.3.4. Cas des terrains en pente

En cas de terrains en pente, le dispositif d'écran de confinement sera impérativement équipé d'un drain en partie amont de façon à ne pas faire obstacle à l'écoulement naturel des eaux.

En cas de membrane anti-évaporation (MAE), celle-ci devra être prolongée en partie amont du bâtiment par une tranchée type tranchée de confinement équipée :

- D'un drain profond sous lequel se retournera la membrane. La largeur de la tranchée devra alors être compatible avec les conditions de mise en œuvre de ce drain,
- Sous le drainage, un prolongement de la tranchée (sur 20 à 30 cm minimum), avec remplissage en matériau (gros béton, par exemple) ne laissant pas l'eau descendre sous le drain

La profondeur du drain est déterminée en fonction de celle des circulations d'eau vis-à-vis desquelles on veut protéger le bâtiment.

EC / EAR

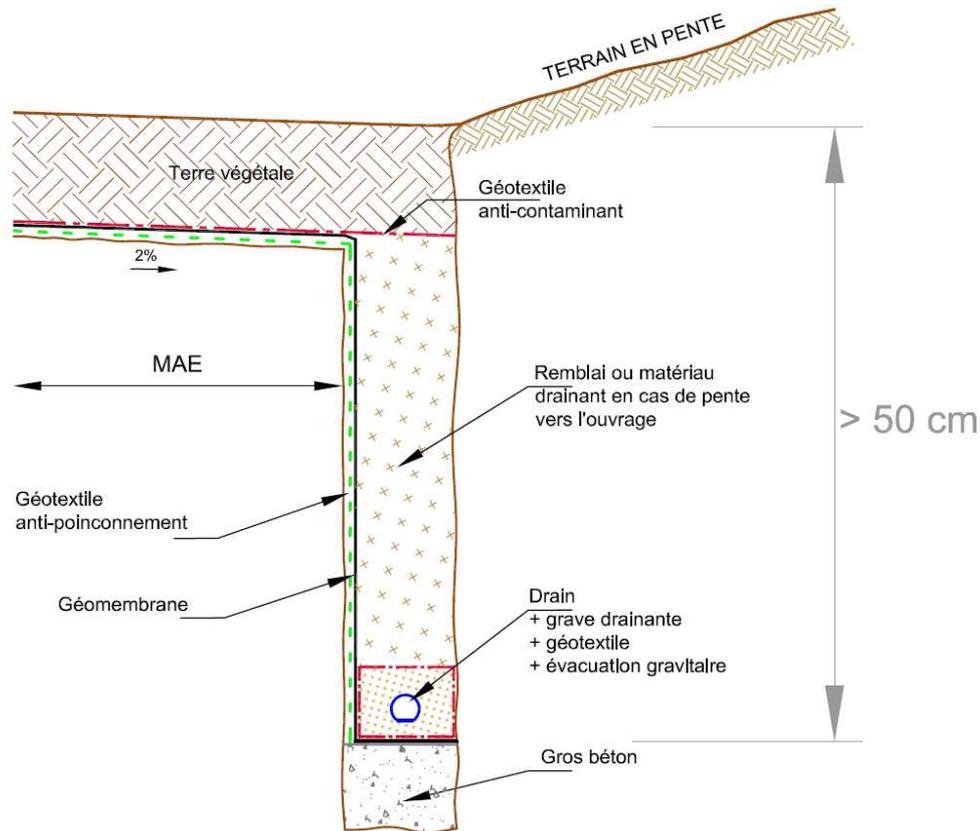


Figure 3 - Écrans – cas des terrains en pente

3.4. CHOIX ET ORGANISATION DES DISPOSITIFS

Dans le cadre des présentes recommandations, nous nous bornerons à indiquer quelques principes généraux, la conception de détail relevant des compétences d'un maître d'œuvre spécialisé. Ce dernier aura à traiter tous les problèmes spécifiques liés aux passages de réseaux, ouvrages enterrés, cheminements, zones de terrasses, drainages existants...

3.4.1. Les membranes anti-évaporation (MAE)

Le principe général est celui de la membrane anti-évaporation (MAE) drainée ou non disposée sur tout le pourtour de l'ouvrage.

Nota : Dans le cas fréquent où une partie du bâtiment est entourée d'une terrasse en béton d'une largeur minimale de 2 m revêtue, il est loisible de conserver cet aménagement sous réserve qu'il n'existe aucun désordre lié au mouvement de terrain dans toute cette partie de bâtiment. Il y a lieu dans ce cas d'étudier les points singuliers de raccordement avec la MAE et la continuité du drainage le cas échéant. **Dans le cas des vides sanitaires ventilés, il est fortement conseillé d'imperméabiliser la surface du sol de ce vide par ce type de dispositif.**

3.4.2. Les écrans anti-racines (EAR)

3.4.2.1 Généralités

Il est préalablement précisé que :

- L'écran anti-racines sera, dans la mesure du possible disposé de façon à ce qu'il n'interfère pas avec les réseaux liés à la construction sinistrée, le passage de ces réseaux constituant des « points faibles » eu égard à la possibilité de pénétration des racines et radicelles. Cet écran sera donc implanté au plus près des végétaux à isoler. Ceci impliquera de différencier les écrans anti-racines des écrans de confinement.
- Le volume exploré par les racines peut être égal au volume du houppier, et le développement des racines est, suivant les espèces, en moyenne égal à la moitié de leur hauteur.
- Chaque fois que cela est possible, il faut privilégier la suppression des végétaux en cause dans la survenance de désordres.
- L'élagage, même sévère et renouvelé annuellement, d'un végétal ayant commencé à provoquer des désordres constitue une mesure insuffisante : elle diminue mais n'annule pas les prélèvements hydriques par évapotranspiration sous les fondations, le système racinaire ne s'en trouvant pas sensiblement modifié.

Les dispositions proposées sont indiquées par le **tableau II** ci-après, en distinguant deux cas :

Dispositions	Pas d'écran	Écran prof. minimale 2m	Abattage
végétaux isolés, ou en haie ou ligne approximativement perpendiculaire à la façade	$D/H > 1$	$1 \geq D/H > 0,2$	$D/H < 0,2$ ou $D < 3m$
végétaux en haie ou ligne approximativement parallèle à la façade	$D/H > 1,5$	$1,5 \geq D/H > 0,25$	$D/H < 0,25$ ou $D < 5m^*$

*dans la mesure où les règles d'Urbanisme le permettent

D : Distance de l'arbre à la construction H : Hauteur de l'arbre à l'âge adulte

Tableau II Géométrie des écrans anti-racines

3.4.2.2 Organisation

- Pour neutraliser un végétal isolé (ou un groupe de végétaux très rapprochés), on réalise un écran anti-racines (EAR) en arc de cercle centré sur ce végétal (ou le centre de ce groupe), d'un rayon de 4 ou 5 m (suivant la « puissance » de l'essence) et d'une longueur égale au tiers du périmètre du cercle correspondant (soit environ 8 ou 10 m – cf. EAR n°2 sur la figure 3).
- Même disposition entre l'extrémité d'une haie ou ligne d'arbres sensiblement perpendiculaire à la façade à protéger et ladite façade (arc de cercle centré sur le premier sujet de la haie ou ligne – Cf. EAR n°2).
- Pour des végétaux en haie ou ligne sensiblement parallèle à la façade à protéger, on réalise un écran anti-racines (EAR) rectiligne parallèle à la façade (Cf. EAR n°1).
- D'une manière générale, lorsque l'on prévoit un Ecran anti-racine (EAR) en plus d'une Membrane Anti-évaporation (MAE), il est préférable de dissocier les deux dispositifs, l'EAR étant placé au plus loin de la construction.

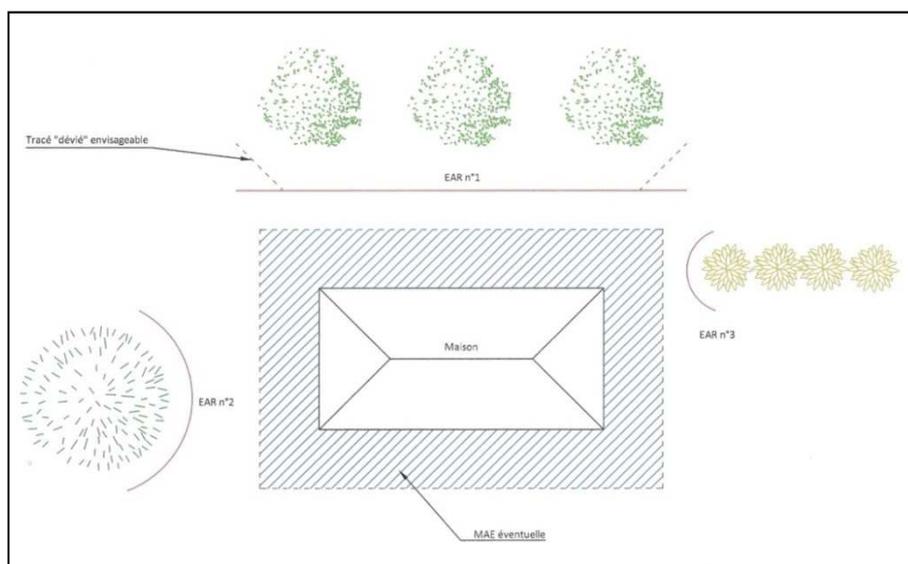


Figure 4 - Écrans – choix et organisation des dispositifs

3.4.3. Les écrans de confinement (EC)

L'objectif de l'écran de confinement est de maintenir, sous les infrastructures du bâtiment sinistré, dans un contexte de sols très sensibles, le massif de sol concerné dans un état hydrique le plus constant possible de façon à éviter toute variation volumique.

On notera toutefois qu'en présence d'arbres, et pour éviter la possibilité d'obstruction du drainage par les développements racinaires, il est conseillé de protéger ce dernier par un écran anti-racines indépendant.

4 MISE EN ŒUVRE

Pour la mise en œuvre du dispositif par membrane périmétrale on se référera aux recommandations du fascicule 10 « recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes » édité par le CFG (CFG2017).

L'entreprise à qui sont confiés ces travaux possèdera une compétence de terrassement et de pose de géomembrane ou à défaut, sous-traitera une partie de sa prestation. Le CFG et l'ASQUAL recommandent d'utiliser des géomembranes certifiées. Qui plus est en cas de soudage, on aura recours à une entreprise disposant de certification soudage de géomembrane type ASQUAL qui disposera donc des moyens nécessaires tels que machines à souder manuelles et automatiques, ainsi que des appareils de contrôle de soudure.

Commentaire : Il est rappelé que ces travaux entrent dans le cadre réglementaire des déclarations préalables obligatoires (Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux - DICT)

4.1. ÉTUDE DE RÉALISATION

Le dossier technique d'exécution comprendra :

- Un plan de repérage (en X, Y, Z) des réseaux existants et des ouvrages enterrés,
- Un plan d'implantation des différents types de dispositifs,
- Les plans d'exécution des ouvrages, y compris levé topographique préalable,
- Les coupes types relatives à chaque dispositif,
- Une note technique détaillant :
 - Les différents types de dispositifs,
 - Les matériaux utilisés,
 - Le phasage des travaux,
 - Les sujétions diverses.

4.2. MISE EN ŒUVRE

4.2.1. Prescriptions concernant le support

Une fois dégagé de toute végétation et terre végétale, le support est composé :

- Du terrain en place avec une forme de pente de 5%,
- Eventuellement de matériaux granulaires (géomatériaux) rapportés afin de corriger l'état de surface du terrain en place,
- Si nécessaire de géotextiles afin d'assurer une fonction de protection anti poinçonnement.

Le contrôle de la couche support (voir chapitre 5) porte sur :

- L'état de surface,
- La granulométrie,
- Le compactage.

4.2.2 Prescriptions concernant les tranchées

Dans la mesure où le contexte géologique est à prédominance argileuse, la réalisation des tranchées ne devrait pas engendrer de sujétions particulières, en termes de terrassement et de tenue des parois.

Pour les tranchées de profondeur supérieure à 1.3 m, qui seront remblayées en béton, le bétonnage se fera à l'avancement du terrassement.

Pour les tranchées de profondeur inférieure à 1.3 m remblayées avec le matériau du site ou du remblai d'apport, on veillera à installer le dispositif dans la continuité du terrassement afin de ne pas laisser la fouille ouverte aux éventuelles intempéries.

Dans tous les cas, l'entreprise devra s'assurer, par une tranchée d'essais, de la bonne tenue des parois, et réaliser un blindage si nécessaire.

4.2.3. Conditionnement et étiquetage des géomembranes

Les géomembranes et géotextiles utilisés devront être conformes, tant en termes de conditionnement que d'étiquetage au **fascicule 10 « recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes » édité par le CFG (version 2017)**

4.2.4. Transport, stockage et manutention

Les géomembranes sont de matériaux fragiles, destinées à assurer une étanchéité. Lors des opérations de transport, de chargement et de déchargement, il convient de prendre toutes les dispositions destinées à limiter l'endommagement éventuel de chaque rouleau (CFG, 2017 fascicules 10). Un fort ensoleillement peut provoquer des phénomènes de dilatation particulièrement sensibles sur les Géomembranes Polyéthylène Haute et Basse Densité (PEHD et PEBD), Polyéthylène de faible densité (VLDPe) et Polyéthylène très flexible (VFPe).

4.2.5. Mise en œuvre de la membrane

Compte tenu des surfaces des membranes à mettre en œuvre, toutes les manipulations pourront se faire manuellement.

Toute circulation d'engins dans les zones revêtues est interdite et on évitera de soumettre la géomembrane déployée à un fort ensoleillement pour les raisons évoquées ci-dessus

La continuité de la membrane déployée sur les zones à traiter sera assurée par collage ou thermo-soudure sur une largeur de 10 à 40 cm selon la famille de géomembrane utilisée ; on se reportera à cet effet au fascicule 10 du CFG (CFG, 2017) résumé dans le tableau ci-dessous :

		<i>PVC-P</i>	<i>PP-F</i>	<i>PEHD</i>	<i>BITUME</i>	<i>EPDM</i>
APPAREILS DE SOUDAGE	Machine automatique à Double soudure	1 par soudeur + 1 en réserve par chantier	1 par soudeur + 1 en réserve par chantier	1 par soudeur + 1 en réserve par chantier	Sans objet	Sans objet
	Soudeuse manuelle air chaud	1 par équipe	1 par équipe	Sans objet	Sans objet	Sans objet
	Extrudeuse manuelle	Sans objet	1 par chantier + 1 en réserve par chantier	1 par chantier + 1 en réserve par chantier	Sans objet	Sans objet
	Chalumeau à gaz avec accessoires	Sans objet	Sans objet	Sans objet	1 par soudeur + 1 en réserve par chantier	Sans objet
MATERIAUX D'ASSEMBLAGE		/	Fil ou granule pour extrusion	Fil ou granule pour extrusion	/	Primaire et « tape »

Tableau 4 — Moyens nécessaires aux assemblages

- En complément il peut être admis, pour ce domaine d'emploi, d'autres types d'assemblages pour les géomembranes PEHD

Dans le cas de tranchées de confinement, il peut s'avérer difficile d'effectuer une soudure verticale pour raccorder deux panneaux. Dans ce cas particulier, on pourra admettre un raccordement par simple superposition des panneaux de membrane sur 1 m minimum.

On veillera à éviter l'insertion de matériaux entre les deux géomembranes au cours du remblaiement de la tranchée.

Il pourra être utile, dans ce dernier cas, de mettre en œuvre, au droit de la jonction, une bande de protection supplémentaire.

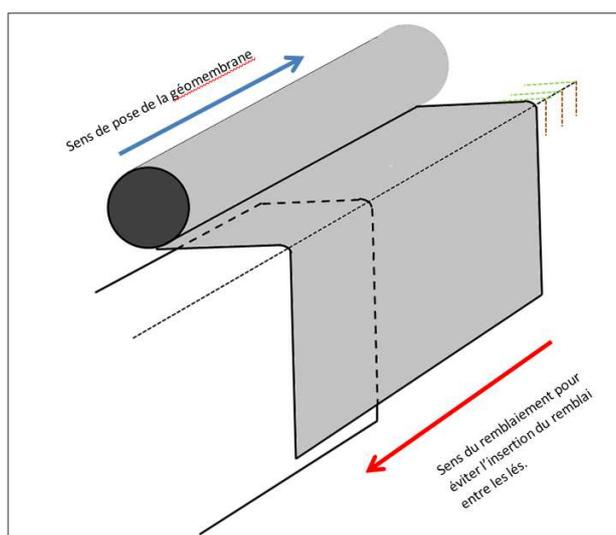


Figure 5 - Mise en œuvre de la membrane

Le remblaiement des tranchées s'effectuera dans le sens opposé au sens de pose des lés.

Avant la mise en œuvre de la membrane, il pourra s'avérer nécessaire de purger les éléments saillants et de mettre en place un géosynthétique anti-poinçonnement.

• Réalisation des soudures sur chantier

Les soudures sur géomembranes ne sont réalisées que par temps sec, à une température minimale de 0°C (-5°C pour les Gmb bitumineuses).

La membrane doit être propre et sèche tout particulièrement dans les zones à souder.

Pour les géomembranes de la famille des plastomères, les soudures sont effectuées soit par machine automatique à coin chauffant, soit au chalumeau à air chaud avec marouflage à l'aide d'une roulette en caoutchouc siliconé pour les points singuliers (croisements, habillage d'ouvrages...).

Le traitement des points singuliers est effectué par soudure au chalumeau air chaud d'une pièce de même nature que la géomembrane. Celle-ci est préparée et découpée en débordant largement de la zone à traiter.

Pour les géomembranes bitumineuses, les soudures sont réalisées à l'aide d'un chalumeau à propane, suivi d'un marouflage exécuté avant refroidissement du liant bitume, puis d'un chanfreinage à chaud de la bordure du lé.

4.2.6. Raccordements aux ouvrages annexes

Les raccordements des membranes sur les murs de l'ouvrage sont exécutés de façon étanche (mastic) à base de polyuréthane par fixation d'un plat aluminium, inox ou résine à l'aide de chevilles inox.

Les fourreaux, canalisations, regards et autres ouvrages enterrés, devront si possible ne pas traverser la membrane et donc être positionnés au-dessus de celle-ci ou déportés en dehors de la zone traitée. Dans le cas contraire, les traversées de la membrane devront être particulièrement soignées afin d'éviter toute infiltration (relevé d'étanchéité).

5 EXÉCUTION – CONTRÔLE

Lors de la phase d'exécution des ouvrages, il est recommandé que le choix des matériaux, le déroulement des travaux de construction et la qualité de la réalisation soient contrôlés par le maître d'œuvre.

Au-delà des autocontrôles mentionnés ci-devant, deux points d'arrêt seront observés dans la phase d'installation des membranes :

- Réception du support de la membrane ; On vérifie l'état de surface du support, sa géométrie ainsi que la conformité des ouvrages sur lesquels la membrane devra être raccordée.
- Réception du dispositif d'imperméabilisation avant mise en œuvre des matériaux de recouvrement.

5.1. GÉNÉRALITÉS

Les points figurant dans le tableau III devront être vérifiés lors de l'exécution et consignés dans le dossier de récolement pour certains d'entre eux :

Tableau III : points de contrôle

	Contrôles d'exécution	Dossier de récolement
• Validité des hypothèses proposées lors des études de conception ;	X	
• Cohérence entre l'état réel du terrain et les hypothèses prises lors de la conception	X	
• Conformité des matériaux (remblais, couche de forme, béton, géotextile, géomembrane) suivant le cahier des charges ;	X	X
• Référencement des géotextiles et géomembrane ;	X	X

Tableau III : points de contrôle (suite)

	Contrôles d'exécution	Dossier de récolement
• Conditions de stockage des géotextiles et géomembrane ;	X	X
• Pente et étanchéité des réseaux existants (EP, EU) ;	X	X
• Traitement de la végétation (écran anti-racine, élagage...)	X	X
• Nivellement des arases de terrassement ;	X	X
• Stabilité des parois des tranchées ;	X	
• Matériau de remblaiement des tranchées ;	X	X
• Réglage de la couche de forme éventuelle ;	X	
• Nature du support (fond de forme, tranchée) ;	X	
• Calepinage de la géomembrane au niveau des points singuliers (pénétration, passage des réseaux, ...) ;	X	X
• Drainage en extrémité de la géomembrane et regards de visite ;	X	X
• Jonctions entre lés (soudure, collage, largeur de recouvrement) ;	X	
• Jonctions avec la construction et traitement des points singuliers ;	X	X
• Contrôle d'absence de flaches en surface de la géomembrane ;	X	
• Contrôle de l'état de la géomembrane avant mise en place de sa protection ;	X	
• Mise en place de la protection de la géomembrane (suivant les cas : géotextile, couche de sable, terre végétale) ;	X	X
• Plans d'exécution et toutes informations consignées lors de la réalisation des travaux.		X

Les écarts observés entre les études de projet et les travaux effectués sur le chantier doivent être rapportés sans délais au Maître d'œuvre pour validation.

5.2. DOSSIER DE RECOLEMENT

Le dossier de récolement des ouvrages exécutés doit être remis par le titulaire du marché au Maître d'œuvre dans un délai de 15 jours suivant la fin des travaux.

5.3. SURVEILLANCE ET ENTRETIEN DES OUVRAGES

Lorsque le dispositif est mis en place en traitement de désordre, une période d'observation de l'ouvrage, de 12 mois minimum, est nécessaire avant le traitement des façades et les travaux de second-œuvre pour s'assurer de la stabilisation de l'ouvrage par ce dispositif.

L'entretien nécessaire pour assurer la sécurité et l'aptitude au service de l'ouvrage doit être spécifié.

Une notice d'entretien doit être établie et comporter, en particulier :

- Les points d'accès au réseau de drainage pour assurer son entretien ;
- Les conditions d'utilisation de l'ouvrage (nature de la végétation, élagage, type de plantation, conditions de réparation...);
- Le dossier de récolement.

La notice d'entretien doit être transmise aux propriétaires successifs

ANNEXES

ANNEXE 1 : RÉFÉRENCES

NF EN ISO 14688-1 (2018) : Reconnaissance et essais géotechniques - Dénomination, description et classification des sols - Partie 1 : dénomination et description

NF EN ISO 14688-2 (2018) : Reconnaissance et essais géotechniques - Dénomination, description et classification des sols - Partie 2 : principes pour une classification

XP P 94-010 (1996) : Sols : reconnaissance et essais - Glossaire géotechnique - Définitions - Notations – Symboles

XP P 94-011 (1999- annulée en 2019) : Sols : reconnaissance et essais – Description-identification-dénomination des sols

NF P 94-048 (1996) : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode du calcimètre.

NF P 94-049 (1996) : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – parties 1 et 2

NF P 94-068 (1996) : Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache

NF EN ISO 17 892-2 (2014) : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 2 : détermination de la masse volumique d'un sol fin

NF EN ISO 17 892-4 (2018) : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrie des particules

NF EN ISO 17 892-12 (2018) : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : détermination des limites de liquidité et de plasticité

XP P94-060-2 (1997) : Sols : reconnaissance et essais - Essai de dessiccation - Partie 2 : détermination effective de la limite de retrait sur un prélèvement non remanié.

XP P94-091 (1995) : Sols : reconnaissance et essais - Essai de gonflement à l'œdomètre - Détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes

NF P 94-500 (2013) : Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications

NF P11-213 -3 (2005) Références DTU 13.3 : Dallage, Conception, calcul et exécution - partie 3

NF P84-500 (2013) : Géomembranes – Dictionnaire des termes relatifs aux géomembranes.

NF P 94-261 (2013) : Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles

NF DTU 21 (2017) : Travaux de Bâtiments – Exécution des ouvrages en béton.

CFG (2017). Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes.

http://www.cfg.asso.fr/sites/default/files/files/publications/geomembranes_n10.pdf

Variations de volume des sols argileux lors des cycles de drainage-humidification – J. Biarez, J.M. Fleureau, M.I. Zerhouni, B.S. Soepandji – *Revue Française de Géotechnique n°41, 1988, p. 63-71.*

Rapport de synthèse final du projet ARGIC (Analyse du retrait-gonflement et de ses incidences sur les Constructions) – Projet ANR-05-PRGCU-005. Vincent M., Cojean R., Fleureau J.-M., Cui Y. J., Jacquard C., Kazmierczak J.-B., Masrouri F., Tessier D., Alimi-Ichola I., Magnan J.-P., Blanchard M., Fabre D., Pantet A., Audiguier M., Plat E., Souli H., Taibi S., Tang A.-M., Morlock C., Maison T., Mrad M., Bréda N., Djeran-Maigre I., Duc M., Soubeyroux J.-M., Denis A., Proust D., Geremew Z., Le Roy S., Dumont M., Hemmati S., Nowamooz H., Coquet Y., Pothier C., Makki L., Chrétien M., Fontaine C. (2009) – Rapport BRGM/RP- 57011-FR en partenariat entre le Centre de Géosciences, le BRGM, le LMSSMat, le CERMES, Fondasol, l'INERIS, le LAEGO, l'INRA, le LGCIE, le LCPC, Météo-France, le GHYMAC et l'Université de Poitiers, 92 p., 29 ill., 6 tabl., 39 ann. (sur CD Rom).

Retrait, gonflement et tassement des sols fins – Gérard BIGOT, Moulay Idriss ZERHOUNI - *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°229, novembre-décembre 2000. NT 4252 – PP 105-114*

Proposition d'une méthodologie d'étude pathologique des constructions. – Catherine JACQUARD, Moulay Idriss ZERHOUNI – SEC2008, Magnan, Cojean, Cui et Mestat (ed.), 2008, Editions du LCPC, Paris

Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. Danielle LAUTRIN. *Bull. de liaison des Ponts et Chaussées N°160- fév. Mars 1989.*

Les essais normalisés de dessiccation et de gonflement des sols argileux – G. Bigot, G. Philipponnat, M.I. Zerhouni – *Colloque MAGI 50, Nancy, 21-22 sept. 1998, Nancy*

Ifsttar et Armines - Retrait et gonflement des argiles - Caractériser un site pour la construction, guide 1. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2017. *Techniques et méthodes, GTI 4-1, 46 pages, numéro ISBN 978-2-85782-724-5*

Ces maisons qui ont soif – 20 ans de sinistres sécheresse (1989 2009) racontés par un expert – Prévention, réparations, réglementation, assurances, ... - Jean-Michel JAVOUHEY – *Edition à compte d'auteur*

Guides ARGIC et MACH, UNEP

ANNEXE 2 : DÉFINITIONS ET PRINCIPES

Annexe A2-1 : Définitions et principes relatifs au sol

Sécheresse :

La sécheresse est le résultat d'une profonde anomalie du bilan hydrique naturel affectant certaines régions au cours de périodes dont la durée peut s'étaler sur une ou plusieurs années. Cette anomalie se traduit par un déficit de teneur en eau. Il est clair que la sécheresse se présente comme un évènement fortuit et n'est pas associable à une tendance climatique persistante.

La prise en compte de ce phénomène avec les 1^{ers} arrêtés de catastrophe naturelle en France Métropolitaine date de 1989.

Sol argileux :

On considère par référence à la norme NFP 94-400-2, qu'un sol est argileux, dès lors qu'il contient plus de 20% en poids de particules inférieures à 63 μm , c'est-à-dire de particules limoneuses (> 2 μm) et argileuses (< 2 μm).

On appelle argile au sens granulométrique un sol naturel constitué pondéralement de plus de 20 % de particules fines inférieures à 2 μm et qui présente une consistance variable suivant la quantité d'eau qu'il contient. On notera toutefois que cette définition ne tient pas compte de la nature même des minéraux argileux, lesquels, de par leur structure peuvent engendrer des comportements différents vis-à-vis des variations hydriques.

Profil hydrique

L'établissement du profil hydrique consiste à apprécier la variation de teneur en eau en fonction de la profondeur et en regard de la coupe lithologique. Ce profil doit être établi avec un pas de 50 cm maximum, et jusqu'à une profondeur où l'on estime que la variation hydrique devient négligeable en fonction de la saison (de l'ordre de 5 m en sol argileux, hors influence de la végétation).

Annexe A2-2 : Définitions relatives au bâtiment

Les bâtiments, pour lesquels les présentes règles peuvent trouver application, relèvent généralement des principes constructifs courants, et les diagnostics sur les structures de ces bâtiments devront être réalisés par des professionnels expérimentés. A ce titre, nous ne reviendrons pas ici sur les définitions de base des éléments constructifs pouvant être rencontrés.

Définitions relatives aux chaînages et raidisseurs

- **Chaînages horizontaux** : ceinturage, en béton armé ou blocs creux destinés à servir de coffrage permanent pour le remplissage en béton armé, incorporé à la construction de l'ensemble des murs d'un bâtiment pour éviter l'écartement.

Ces chaînages peuvent être constitués par un tirant métallique incorporé dans les maçonneries anciennes.

- **Chaînages verticaux** : ouvrages verticaux, en béton armé ou en blocs spéciaux (dits blocs d'angle) destinés à servir de coffrage permanent pour le remplissage en béton armé, incorporés à la construction de l'ensemble des murs d'un bâtiment. Ils sont reliés, par armatures de liaison en équerre, aux fondations et aux chaînages horizontaux.

On veillera particulièrement à ce que tous ces chaînages soient réellement présents, nombre de sinistres rencontrés pouvant être liés à une absence locale ou à un mauvais positionnement des aciers.

Systèmes constructifs pouvant être rencontrés

Parois en maçonnerie traditionnelle de petits éléments (pierres naturelles, briques de terre cuite, blocs de béton, blocs de béton cellulaire). Ces parois peuvent être enduites ou non, chaînées ou non et disposent généralement d'un doublage intérieur (complexe isolant, contre-cloison brique). Les murs anciens en moellons ou pierre de taille peuvent être installés à même le sol, sans ouvrage de fondations.

Annexe A2-3 : Définitions relatives à l'environnement

Hydrogéologie : Science de l'eau souterraine.

Cette science étudie les interactions entre les structures géologiques du sous-sol (nature et structures des roches, des sols) et les eaux souterraines ainsi que les eaux de surface.

Elle applique les connaissances acquises sur la prospection, le captage, l'exploitation et la gestion de l'eau souterraine.

L'hydrogéologie, dont la base fondamentale est la géologie, est une science pluridisciplinaire utilisant les méthodes et moyens de la prospection géophysique, des techniques de forage et de captage, de la géochimie des roches et des eaux, de l'hydrodynamique souterraine, de la mécanique des fluides, de la statistique, du traitement des données et de la modélisation mathématique des écoulements.

Végétation :

Typologie racinaire : On distingue 2 systèmes de réseaux racinaires, comportant au total 8 types de racines :

- **Réseau racinaire traçant :** Constitué principalement de racines superficielles à dominante horizontale,
- **Réseau racinaire plongeant :** Constitué d'ensembles de pivots soit verticaux, soit obliques, soit verticaux et obliques.

L'architecture racinaire est propre à chaque espèce et est en général composée des 2 systèmes de réseaux associant plusieurs types de racines pour les espèces les plus communes (chêne, hêtre ou pin par exemple).

Phénomènes d'évaporation et d'évapotranspiration

L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes.

Tous les arbres sont hygrophiles, principalement en période de feuillaison. Les besoins en eau, cependant, varient selon les essences. A titre d'exemples, un chêne adulte hisse quotidiennement près de 200 litres d'eau à une hauteur d'une trentaine de mètres et un hectare de hêtraie, qui consomme de 2.000 à 5.000 tonnes d'eau par an, en restitue 2.000 par évaporation.

Zone d'action des racines (au-delà de l'emprise racinaire)

Le schéma organisationnel du système racinaire s'adapte aux situations rencontrées. Les racines vont là où il y a de l'eau (hydrotropisme racinaire), et peuvent de ce fait s'installer sous les bâtiments, en cas de déficit hydrique, puisque c'est là que le sol reste humide par défaut d'évaporation. Il n'y a donc pas de règle précise quant à la distribution des racines dans le sol, ni en ce qui concerne l'espèce végétale intéressée, ni en ce qui concerne la distance de propagation des racines et radicelles.

Annexe A2-4 : Choix des matériaux géosynthétiques :

➤ Fonctions étanchéité

Pour tout ce qui concerne le choix et des conditions de mise en œuvre des géosynthétiques , on se reportera au Fascicule 10 « Recommandations pour la réalisation des tranchées par géomembranes » édité par le Comité Français des Géosynthétiques (CFG) et téléchargeable sur le site cfg.asso.fr.

➤ Fonction protection

Les géotextiles non-tissés pourront remplacer avantageusement les couches minérales pour leur faible coût et leur facilité de mise en œuvre.

ANNEXE 3 : RETRAIT/GONFLEMENT

Argiles

Dans les sols fins à dominante argileuse, les variations de volume sont le plus souvent associées aux variations de la quantité d'eau interstitielle absorbée ou expulsée. **Ceci est particulièrement valable lorsque ces sols sont saturés ou proches de la saturation.** Un départ d'eau interstitielle se traduira par une réduction du volume du sol, donc un retrait et, à l'inverse, un apport par une augmentation de volume, donc un gonflement. Ces phénomènes seront d'autant plus importants que la capacité de l'argile à adsorber l'eau est grande, cette capacité dépendant de la structure cristalline des particules d'argile.

À l'état microscopique, ces particules sont constituées de feuillets élémentaires qui se superposent en une structure plane et irrégulière qui croît jusqu'à une taille critique identifiable granulométriquement par sédimentométrie. Ce micro-agrégat, appelé plaquette, est le plus petit grain dissociable mécaniquement. Sa taille va de 0,1 à 1,5 μm pour la plus grande dimension.

C'est l'eau qui sert de lien entre les plaquettes et entre les feuillets (voir Fig. 1) ; l'acquisition d'eau supplémentaire au sein de cette structure va provoquer un gonflement interfoliaire en écartant les feuillets.

L'eau adsorbée sur la surface externe des particules argileuses et entre les feuillets argileux est due à un phénomène de déficit de charge électrique à la surface des feuillets. L'amplitude du phénomène d'hydratation dépend du type d'argile et donc de la structure minéralogique de l'argile : il est, par exemple, plus important pour les smectites que pour les illites.

Lors de la diminution de teneur en eau dans l'argile, la succion (= pression de l'air – pression de l'eau) augmente, augmentant l'état de contrainte effective dans le sol : le volume du sol diminue.

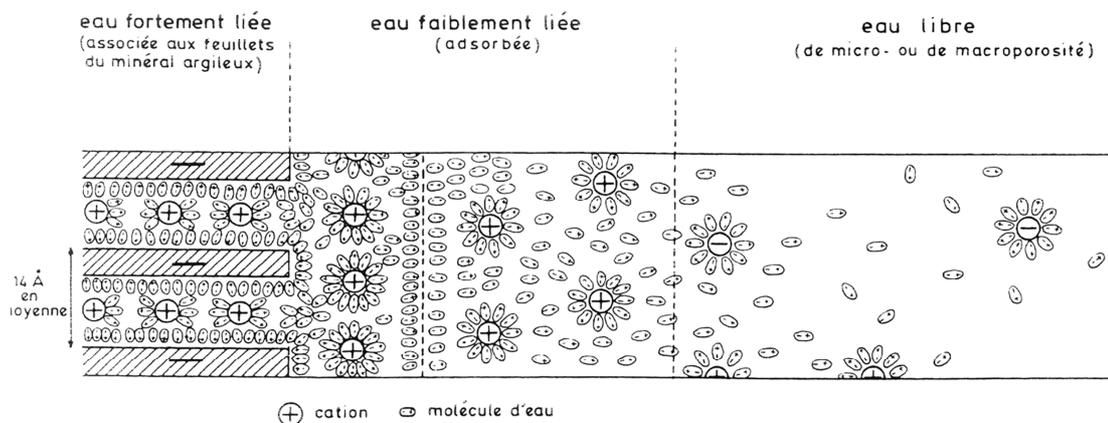


Figure 1 : Structure foliaire et différents types d'eau en relation avec les minéraux argileux (d'après Sergeev, 1971)

La dessiccation des couches « superficielles » des sols argileux et limoneux, qui provoque leur retrait, en période de sécheresse, peut avoir diverses origines :

- L'évaporation de l'eau, sous les effets conjugués de la température élevée et de la faible hygrométrie de l'air (surtout lorsque souffle un vent sec) est nettement plus intense que la réhydratation par les pluies, faibles - voire inexistantes,
- les racines des végétaux, qui s'étendent jusqu'à proximité immédiate des bâtiments, et même au-dessous, pour y puiser l'eau nécessaire à leur croissance,
- Des modifications au niveau des nappes, phréatiques ou de versants, liées ou non à un déficit d'apport d'eaux météoriques

Au fil des années de sécheresse, on a pu constater que le second mécanisme devenait de plus en plus prépondérant dans la survenance des désordres.

L'analyse de l'essai de retrait reliant la variation de volume en fonction de la teneur en eau (fig.2 ci-contre) met en évidence les principales phases du comportement du sol. Lorsque la teneur en eau d'un sol saturé décroît, le sol réduit son volume en restant saturé jusqu'à un seuil de début de désaturation. Dans cette phase 1, la variation de volume ou retrait équivaut à la quantité d'eau extraite du sol.

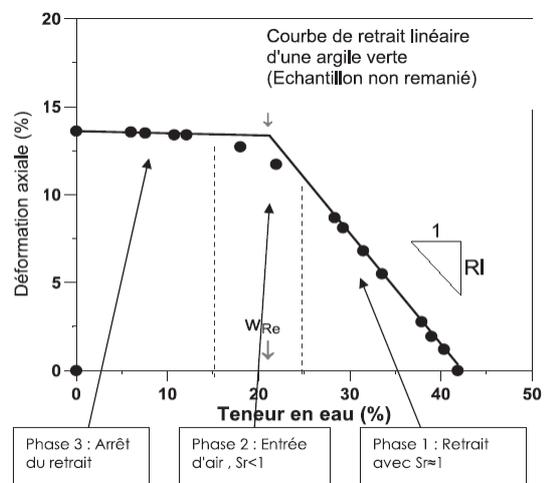


Figure 2

Si la quantité d'eau continue de décroître, la diminution de volume continue (phase 2) avec une amplitude qui devient de plus en plus faible et qui n'est plus proportionnelle à la variation de teneur en eau, jusqu'à devenir quasiment nulle (phase 3).

La limite de retrait effective W_{Re} se situe entre les phases 1 et 3.

A l'inverse un apport d'eau conduira à une augmentation du volume du sol ou gonflement. L'intensité de ce gonflement peut être très variable et souvent sans rapport avec l'amplitude du retrait subi antérieurement par ce même sol. Le gonflement des particules argileuses est directement lié à leurs propriétés électrochimiques et à leur surface spécifique. Il varie d'une famille à l'autre. Les argiles les plus gonflantes sont les smectites qui ont une surface spécifique nettement supérieure aux autres argiles; puis viennent les illites et enfin la kaolinite.

Le phénomène de retrait-gonflement est un phénomène physico-chimique, qui n'est pas entièrement réversible, du fait d'une évolution structurale.

La sensibilité aux variations de volumes lors des variations hydriques dans un sol dépend de plusieurs facteurs (voir Fig. 3) :

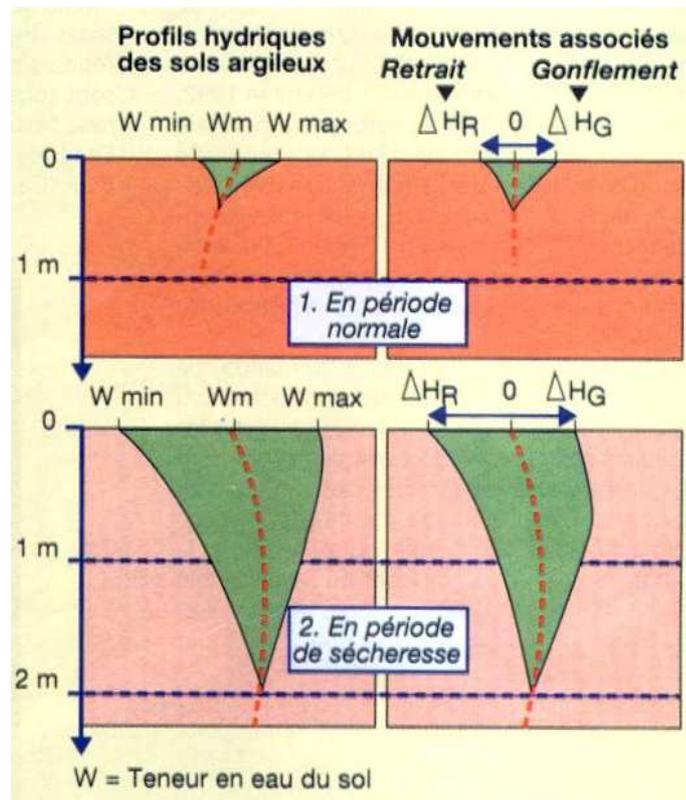


Figure 3

- La granularité du sol,
- La nature minéralogique des particules argileuses,
- La présence d'autres minéraux non argileux, notamment de carbonates, qui ont tendance à limiter les variations volumiques,
- La structure du sol,
- Son état initial : teneur en eau, succion, poids volumique, indice des vides,
- L'état de consolidation du sol : normalement consolidé, sur consolidé.

ANNEXE 4 : MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDES CONCERNANT LES SYSTÈMES DE STABILISATION PAR MEMBRANES DES OUVRAGES EXPOSÉS À LA SÉCHERESSE.

Annexe A4.1 : Diagnostic

Le diagnostic géotechnique (G5) se rapporte ici à la Norme NF P94 500 qui appelle, concernant les réparations ou traitement préventif par géomembranes, les remarques et compléments suivants :

En préalable, il convient de souligner que ce diagnostic, comme tout diagnostic géotechnique relatif à des désordres liés à une déformation intéressant les infrastructures, doit impérativement être mené parallèlement à un relevé systématique des désordres (typologie, localisation, géométrie) **et à un diagnostic des structures de l'ouvrage.**

L'offre technique doit donc comporter la nécessité d'établir un diagnostic des désordres et des structures, lequel pourra être intégré à l'offre du géotechnicien ou réalisé en parallèle.

Il est fortement recommandé de réaliser ou de faire réaliser le diagnostic structure avant d'établir la note technique de définition du programme d'investigations géotechniques.

L'analyse successive des résultats des différents diagnostics prend ici une importance primordiale dans la mesure où des critères d'arrêt relatifs à la méthode de réparation par membrane sont prévus dans les présentes recommandations.

N°	Caractéristiques et objectifs du diagnostic	Prestations à réaliser et documents à fournir par l'ingénierie	À fournir par le client
A4.1.1 Offre technique			
A4.1.1.1	Analyser la demande du client	<p>Analyser et identifier les problèmes posés et particulièrement l'adéquation désordre/sécheresse</p> <p>Analyser les documents fournis par le client</p> <p>Faire une enquête de voisinage</p> <p>Faire une enquête documentaire du cadre géotechnique</p> <p>Demander un diagnostic complet des désordres</p> <p>Demander un diagnostic des structures de l'ouvrage sinistré.</p>	<p>Tous plans existants relatifs à l'ouvrage y compris réseaux (initial et ajouts ou transformations éventuellement réalisés)</p> <p>Tous rapports géotechniques existants concernant l'ouvrage et/ou le site de son implantation</p> <p>Tous documents en relation avec l'ouvrage sinistré</p> <p>Sujétions d'accès Historique du site</p> <p>Evénements significatifs survenus lors de la construction, des transformations et ajouts éventuellement réalisés, et en cours de vie de l'ouvrage</p> <p>Tout autre document nécessaire à la définition et à la compréhension du ou des éléments géotechniques et du ou des problèmes géotechniques spécifiques à traiter</p> <p>Chronologie datée de la survenance et de l'évolution des désordres (documents photographiques souhaités)</p> <p>Préciser le cadre du diagnostic : Demande de la part du propriétaire, d'un assureur, d'un expert.</p>
A4.1.1.2	<p>Proposer un programme d'étude de diagnostic incluant un programme d'investigation et/ou d'auscultation adapté aux problèmes identifiés, pour répondre aux besoins du client ou du demandeur</p>	<p>Définir un programme d'étude de diagnostic présentant :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Les objectifs de l'étude ➤ Le programme d'investigations et/ou d'auscultation spécifique éventuelle nécessaires à l'établissement du diagnostic, à faire exécuter ➤ Les étapes suivies ➤ La liste et le contenu des documents qui seront remis en fin de mission <p>Prise de contact préalable avec le client et les tiers concernés pour se mettre en accord à l'avance sur les conditions générales d'intervention</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Visite des lieux ➤ Etablissement de la liste des sujétions et autorisations d'accès et d'intervention, des aménagements à effectuer, des dégâts prévisibles et des moyens de remise en état. 	<p>Accord sur le programme</p> <p>Les sujétions particulières relatives à l'ouvrage ou à son environnement.</p> <p>Les sujétions particulières relatives à la procédure éventuellement engagée (amiable ou judiciaire)</p>

N°	Caractéristiques et objectifs du diagnostic	Prestations à réaliser et documents à fournir par l'ingénierie	À fournir par le client
A4.1.2 Réalisation de la mission			
A4.1.2.1	<p>Définir ou confirmer le plan d'étude du diagnostic, si nécessaire, en fonction des données connues du terrain, de l'expérience locale et du problème spécifique à traiter.</p> <p>Obtenir les données nécessaires pour atteindre les objectifs de la mission et vérifier la validité des informations fournies par le client</p>	<p>Enquête documentaire (archives, géologie, publications, antécédents.....)</p> <p>Note technique de définition du programme des investigations et d'auscultation éventuellement nécessaires pour l'établissement du diagnostic, précisant :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Type, nombre, implantation et altimétrie, profondeur théorique des forages, essais et mesures avec conditions d'arrêt. ➤ Nature et condition de réalisation des essais et mesures. ➤ Conditions et caractéristiques de prélèvement des échantillons pour essais en laboratoire ➤ Programme des essais en laboratoire ➤ Tous autres essais et investigations nécessaires à la réalisation de la mission ➤ Adaptation possible des investigations et auscultations, en fonction des premiers résultats obtenus et du résultat du diagnostic structure réalisé par ailleurs ➤ Contrôle de l'étanchéité des réseaux ➤ Auscultation de la structure (voir A4.1.2.3) 	<p>Dossier complet relatif à l'ouvrage (plans d'architecte, dossier de permis de construire, marchés complets relatifs à la construction initiale ou aux éventuelles modifications) et tout document existant susceptible d'intéresser les ingénieries chargées des diagnostics structure ou géotechnique.</p>
A4.1.2.2	<p>Assister techniquement le client pour le choix des prestataires (ingénieur structure, entreprises) devant réaliser les investigations géotechniques et structurales éventuelles</p>	<p>Participer à l'analyse des références des prestataires.</p> <p>Faire l'analyse des offres des prestataires</p>	<p>Références des prestataires pressentis</p> <p>Réponses détaillées des prestataires.</p>

N°	Caractéristiques et objectifs du diagnostic	Prestations à réaliser et documents à fournir par l'ingénierie	À fournir par le client
A4.1.2.3	<p>Diagnostic des structures de l'ouvrage et des désordres*</p> <p>*A faire réaliser par un Ingénieur structures</p>	<p>Analyse et validation le cas échéant des données géotechniques disponibles.</p> <p>Examen des plans « structures » de l'ouvrage, particulièrement :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Chaînages et tous éléments de rigidification ➤ Fondations et liaisons super/Infrastructures ➤ Matériaux de construction utilisés <p>Des investigations, destructives ou non, devront vérifier la conformité avec les plans produits.</p> <p>Cette analyse conduira à un premier examen de la causalité des désordres et de leur adéquation avec le contexte géotechnique et les structures de l'ouvrage.</p> <p>Cette analyse peut constituer un 1^{er} point d'arrêt à la méthode de stabilisation par membranes, et donc au diagnostic géotechnique.</p>	
A4.1.2.4	Suivre et contrôler l'exécution des investigations géotechniques et des auscultations	Assurer une surveillance régulière Rendre compte régulièrement des avancements (réunions de chantier périodiques)	La commande passée au prestataire chargé des investigations géotechniques Le client doit faire obligation au prestataire de fournir régulièrement le résultat de ses sondages et essais
A4.1.2.5	Adapter le programme des investigations et/ou d'auscultation en fonction des premiers résultats obtenus.	Analyser régulièrement les résultats recueillis pour permettre d'orienter et de modifier si nécessaire le programme.	Accord écrit sur les modifications proposées par l'ingénierie géotechnique ou compte rendu de réunion
A4.1.2.6	Interpréter les résultats de la campagne d'investigations. Valider les données factuelles fournies par le prestataire chargé de la campagne d'investigations	Contrôler le dépouillement des essais et en faire l'analyse critique.	

N°	Caractéristiques et objectifs du diagnostic	Prestations à réaliser et documents à fournir par l'ingénierie	À fournir par le client
A4.1.2.7	Examiner et valider la cohérence des données collectées et en faire la synthèse	<p>Confronter les données entre elles</p> <p>Etablir les coupes et profils interprétatifs, en rapport avec le maillage et la nature des investigations réalisées.</p> <p>Définir les formations identifiées comme homogènes au regard du problème posé, confirmer ou adapter leurs valeurs caractéristiques en rapport avec les résultats des essais effectués.</p> <p>Confirmer les objectifs et les limites de la mission</p>	Nota : les données antérieures sont également prises en compte si elles sont jugées représentatives.
A4.1.2.8	Diagnostic géotechnique	<p>Identifier les documents fournis et valider la connaissance de l'ouvrage</p> <p>Valider la connaissance et l'environnement géotechnique du site</p> <p>Essayer d'apprécier au mieux la zone d'influence géotechnique, eu égard notamment à la végétation environnante.</p> <p>Confirmer les objectifs et les limites de la mission</p> <p>Confirmer ou non la possibilité de mise en œuvre de la technique de stabilisation par géomembrane.</p> <p>Cette analyse peut constituer un 2^{ème} point d'arrêt dans l'hypothèse où l'hétérogénéité du contexte lithologique ou la nature des sols rend l'efficacité de la membrane très aléatoire à long terme.</p> <p>Définir les mesures conservatoires et les méthodes de réparations et/ou de rigidifications à réaliser sur l'ouvrage.</p> <p>Examiner la nécessité de compléments d'études éventuels.</p> <p>Le rapport doit respecter un plan type comprenant au minimum :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Les éléments généraux définis en 5.3 de la Norme NFP 94-500 ➤ Les documents de référence utilisés (normes, recommandations, DTU) <p>Les données collectées lors de la réalisation de cette mission.</p>	Dossier complet remis en 2.1
A4.1.3	Rapport de synthèse	<ul style="list-style-type: none"> • Conclusions, sur la base des différents diagnostics, de la faisabilité de la solution de stabilisation des sols par imperméabilisation périmétrale de l'ouvrage. 	Acceptation du rapport suivant les conditions de l'offre

Annexe A4.2 : Mission d'ingénierie de conception des systèmes de membranes des ouvrages exposés à la sécheresse.

Remarque préliminaire : Cette mission vient obligatoirement après que les missions de diagnostic géotechnique G5 et de structures aient été réalisées. Des investigations ont donc déjà été réalisées dans ce cadre.

Dans le principe, il est établi pour ce type de travaux que les missions de Diagnostic (G5) d'une part et les missions de Projet (G2) d'autre part peuvent être réalisées par des géotechniciens différents. Par contre, il est souhaitable que les missions G2 et G4 soient réalisées par le même géotechnicien.

Tableau A4.2 - Étude géotechnique de conception du projet (G2)

Cette mission permet d'étudier le projet et d'établir les documents nécessaires à la consultation des entreprises.

	Caractéristiques et objectifs de la mission de conception du projet	Prestation à réaliser et documents à fournir par l'Ingénierie Géotechnique	Action du Client
A4.2.1.1	Donner un avis sur le diagnostic structure réalisé.	Au besoin, demander des informations ou des investigations supplémentaires.	Fourniture d'un diagnostic de structure de l'ouvrage (peut être inclus au diagnostic géotechnique) définissant les éventuels confortements de structures à prévoir en accompagnement de la méthode de stabilisation des sols de fondation par imperméabilisation périmétrale à l'aide de géomembranes.
A4.2.2	Analyse et validation ou non du diagnostic fourni et des conclusions en termes de préconisations.	En cas de nécessité, proposition d'investigations supplémentaires : Définition du programme précis en termes de sondages et d'essais permettant de valider la faisabilité de la méthode.	Fourniture du diagnostic géotechnique (G5) comportant : <ul style="list-style-type: none"> ➤ La localisation du site ➤ La cause des désordres ➤ Les méthodes possibles de réparation ou de stabilisation, incluant la méthode objet du présent document

	Caractéristiques et objectifs de la mission de conception du projet	Prestation à réaliser et documents à fournir par l'Ingénierie Géotechnique	Action du Client
A4.2.3	Suivi géotechnique des investigations complémentaires demandées et analyse des résultats	Réalisation et/ou suivi géotechnique des investigations géotechniques complémentaires éventuelles. Validation de la faisabilité de la méthode réparatoire par imperméabilisation périmétrale Etude des contraintes particulières liées : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Aux écrans anti-évaporation (MAE) drainés ou pas ➤ Aux écrans anti-racines (EAR) ➤ Aux dispositifs de confinement (DCG ou DCP) 	Commande des investigations géotechniques supplémentaires demandées.
A4.2.4	Réalisation du complément de diagnostic structures dans l'objectif de valider la méthode de confortement par imperméabilisation périmétrale.	Validation des mesures complémentaires à mettre en œuvre au niveau des infrastructures (longrine de rigidification, reprise ou remise à niveau du dallage, interventions sur réseaux ...)	Commande d'une mission complémentaire permettant d'affiner le diagnostic structure et/ou des superstructures (rigidification, reprise des fissures,...), et si nécessaire définition des mesures complémentaires à mettre en œuvre à ce niveau
A4.2.5	Proposition du contrat de conception du projet (en coordination si nécessaire avec un ingénieur structures)	Proposition de contrat précisant les modalités d'études envisagées (y compris les prestations d'investigations géotechniques telles que sondages et essais, voire les prestations d'investigations sur structures et réseaux, jugées nécessaires à ce stade)	Accord sur contrat

	Caractéristiques et objectifs de la mission de conception du projet	Prestation à réaliser et documents à fournir par l'Ingénierie Géotechnique	Action du Client
A4.2.6	Etablissement du dossier de consultation des Entreprises (DCE)	Rédaction d'un Dossier de Consultation des Entreprises (D.C.E.) comprenant : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Cahier des Clauses Techniques Particulières (C.C.T.P.) ayant pour but de définir tous les travaux à exécuter et de préciser les limites des fournitures et prestations dues au titre du marché. ➤ Plans de principe ➤ Contrat de Travaux (C.T.) ➤ Pièces annexes (Rapport G5 par exemple) ➤ Phasage des différents lots Planning 	Accord sur le D.C.E.
A4.2.7	Etablissement du contrat travaux	Assistance à la Maîtrise d'Ouvrage pour la sélection des Entreprises et l'analyse des offres	Fournir les offres des entreprises Accord sur le choix de l'entreprise

Annexe A4.3 : Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3)

La mission d'ingénierie géotechnique G3 à réaliser à cette étape sera entreprise après l'étude géotechnique de projet (G2). Elle sera à la charge et le plus souvent réalisée par l'entreprise qui réalisera les travaux.

N°	Caractéristiques et objectifs de la mission G3	Prestation à réaliser et documents à fournir par l'Entreprise	Action du Client
A4.3.1 Offre Technique			
A4.3.1.2	Analyser la demande du client	Analyser les données et identifier les problèmes posés Analyser les documents fournis par le client	Fournir : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Les rapports des missions géotechniques antérieures (G5 – G2) ➤ Le dossier marché comprenant le dossier de consultation des entreprises ou le dossier projet.
A4.3.1.2	Donner un avis sur les notices techniques (méthodes d'exécution et de dimensionnement)	Analyse détaillée des documents issus des missions géotechniques réalisées. Confirmer ou adapter les méthodes prévues	Notices techniques de l'étude géotechnique de projet
A4.3.2 Réalisation de la mission			
A4.3.2.1	Etablir les notices d'exécution détaillées des ouvrages	Fournir les notes techniques détaillées (descriptif, plans, coupes) sur : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Les méthodes d'exécution des ouvrages : Terrassements, renforcements des structures ou des fondations, raccordement des réseaux, drains, géomembranes ➤ Les caractéristiques des matériaux utilisés (Géomembranes, anti-contaminants, matériaux de remblaiement des tranchées...) ➤ Les dispositions à prendre vis-à-vis des nappes, des végétaux, des réseaux existants.... ➤ Les dispositions constructives complémentaires à mettre en œuvre lors de la survenance de certains risques identifiés (hétérogénéités, ouvrages enterrés non prévus...) Et préciser : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Les phasages détaillés ➤ Le planning ➤ Les éléments à intégrer dans l'organisation du contrôle qualité. 	Données complémentaires s'avérant nécessaires en cours d'étude. Accord sur les dispositions proposées et les documents définitifs suivant les conditions d'étude

N°	Caractéristiques et objectifs de la mission G3	Prestation à réaliser et documents à fournir par l'Entreprise	Action du Client
A4.3.2.2	Travaux	Réalisation des travaux conformément aux notices d'exécution des travaux établies, sous le contrôle du géotechnicien en charge de la mission G4. En cas d'anomalie ou d'imprévu, tant en ce qui concerne le contexte géotechnique que les ouvrages existants, les dispositions modificatives du projet devront être prises en accord avec le géotechnicien en charge de la mission G4.	Accord sur les modifications éventuelles dues aux aléas rencontrés.
A4.3.2.3	Dossier géotechnique d'exécution	Dossier récapitulatif des travaux réalisés : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Note de présentation générale ➤ Tout ou partie des notes détaillées fournies incluant les éventuelles modifications en cours de chantier ➤ Plans de récolement des ouvrages. 	Accord sur la constitution du dossier.

Annexe A4.4 : Supervision du suivi géotechnique d'exécution (G4)

Consiste à superviser l'étude et le suivi réalisé par l'entreprise.

N°	Caractéristiques et objectifs de la mission de supervision géotechnique d'exécution	Prestation à réaliser et documents à fournir par l'Ingénierie Géotechnique	À fournir par le Client
A4.4.1	Donner un avis sur le projet d'exécution géotechnique, y compris plans et notice technique	Analyse détaillée des documents de l'étude géotechnique d'exécution Etablissement d'une note de commentaires	Tous les diagnostics et études préalablement réalisés : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Diagnostics préalables ➤ Etude géotechnique de conception ➤ Etude géotechnique d'exécution réalisée par l'entreprise
A4.2	Donner un avis sur les plans et notices techniques (méthodes d'exécution, dimensionnement, choix des matériaux et des types de géomembranes)	Effectuer l'analyse détaillée des documents Rédiger une note de commentaires	

N°	Caractéristiques et objectifs de la mission de supervision géotechnique d'exécution	Prestation à réaliser et documents à fournir par l'Ingénierie Géotechnique	À fournir par le Client
A4.3	Vérifier le dimensionnement détaillé des ouvrages concernés (renforcements, reprises des fondations, rigidifications des structures)	Effectuer l'analyse détaillée des documents Rédiger une note de commentaires	
A4.4	Avis sur l'adaptation ou l'optimisation des ouvrages géotechniques proposés par l'entreprise	Effectuer l'analyse détaillée des documents Rédiger une note de commentaires et comptes rendus de chantier.	Résultats du suivi d'exécution de l'entreprise
A4.5	Le cas échéant, vérification des résultats des tests demandés en cours de pose	Vérification de la conformité des valeurs mesurées par rapport aux valeurs seuil définies	
A4.6	Dossier de supervision géotechnique d'exécution	Dossier récapitulatif de la mission : note de présentation générale, tout ou partie des notes détaillées Validation du plan de récolement	Accord sur le dossier Réception de l'ouvrage