



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Projet VISEGEO (Vigilance Sécheresse Géotechnique). Synthèse des travaux réalisés

Rapport final

BRGM/RP-72231-FR

Version [1] du 26 octobre 2022

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

B. Colas, M. Prémaillon, I. Bouroullec

Vérificateur :

Nom : S. Gourdier

Fonction : Responsable d'unité

Date : 07/11/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : A-V. Hau-Barras

Fonction : Directrice régionale

Date : 10/11/2022

Signature :

GEOSEC
predict

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : Aléa, Retrait-gonflement des argiles, Prévision, Vigilance, Indicateur, Gestion du risque, Occitanie

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

B. Colas, M. Prémaillon, I. Bouroullec (2022) – Projet VISEGEO (Vigilance Sécheresse Géotechnique). Synthèse des travaux réalisés. Rapport final V[1]. BRGM/RP-72231-FR, 54 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-22/09/2022

Synthèse

Le projet VISEGEO, porté par le consortium BRGM, PREDICT et GEOSEC, est soutenu par la Région Occitanie et l'Europe (FEDER), dans le cadre de l'appel à projet READY'NOV, et le Ministère de l'Écologie. Il vise à définir une amélioration de la prévention du risque retrait-gonflement des sols argileux (RGA) dont les impacts sont financièrement très élevés au niveau national (2^{ème} poste d'indemnisation Cat Nat après les inondations).

Les contenus scientifiques et techniques du projet ont permis de développer de :

- Schémas de caractérisation spatio-temporelle de la sévérité de phénomènes de RGA ;
- Modes de transferts d'information vers les utilisateurs du service ;
- Préconisations opérationnelles pour limiter / réduire les impacts du phénomène.

La solution intégrée VISEGEO est axée sur le principe des niveaux de sécurité PREDICT pour les inondations. La solution renvoie des niveaux d'actions (information / organisation / protection) selon des niveaux de sécurité gradués (vigilance / mobilisation / sécurité). Le projet est marqué par le développement d'un outil opérationnel basé sur des analyses physiques de comportement des sols sensibles au phénomène de retrait-gonflement, afin de créer une couche spatiale caractérisant l'aléa sécheresse en temps réel. La résolution spatiale de l'analyse est l'échelle communale.

Le BRGM, outre la réalisation de l'état de l'art, a réalisé des analyses spécifiques sur la caractérisation spatio-temporelle de l'aléa sécheresse géotechnique en intégrant les chroniques historiques Météo-France mises à dispositions par PREDICT. En parallèle, deux sites pilotes ont été instrumentés pour la création d'indicateurs visant à caractériser le RGA en temps réel (sites Labège et Cornebarrieu, Haute-Garonne).

En fin de projet, le démonstrateur VISEGEO s'appuie sur les développements déterminant les niveaux de seuils pour la préconisation de recommandations. Le système développé est un système pré-opérationnel au sens de TRL 4 à 6. En fin de projet l'objectif est d'aboutir à un démonstrateur au sens du TRL 7 avec installation de poste dédié au sein de la Vigie PREDICT et mise en test de l'ensemble de la chaîne de traitement jusqu'à la transmission d'informations aux utilisateurs finaux ciblés.

Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Etat de l'art (D1)	11
2.1. Sécheresse	11
2.2. Mécanisme RGA.....	14
2.3. Dommages et impacts	15
2.4. Solutions de gestion du risque RGA	16
3. Sites instrumentés (D3).....	17
3.1. Instrumentation des sites	17
3.2. Valorisation des données.....	22
4. Solution intégrée VISEGEO	25
4.1. Eléments de contexte du développement.....	25
4.2. Enjeux et objectifs du projet.....	27
4.3. Solution technique proposée	27
4.3.1. <i>Etude paramétrique (D2)</i>	28
4.3.2. <i>Cartographie dynamique de l'aléa RGA et définition de seuils (D4)</i>	37
5. Catalogue de dispositions opérationnelles de réduction des aléas et/ou des vulnérabilités des infrastructures exposées (D5)	43
6. Démonstrateur VISEGEO : mise en œuvre d'une maquette, pilote de la solution intégrée (D6)	45
7. Actions de communication	49
8. Conclusion.....	51
9. Bibliographie.....	53

Liste des figures

Figure 1 – Structuration générale du projet.....	9
Figure 2 – Etat de l’art, extrait du rapport BRGM RP-71773-FR.....	11
Figure 3 - Indicateur SWI, variation saisonnières.....	13
Figure 4 – a) Cartes d’anomalie sécheresse à échelle européenne (EDO – European Drought Observatory) b) Cartes d’humidité du sol à forte répétitivité temporelle (une carte tous les 6 jours) à l’échelle sub-parcellaire sur de nombreux sites en France, en Europe et autour du bassin méditerranéen (CES HTHR) c) Cartes d’humidité à une échelle intra-parcellaire (zones homogènes de 0,2 hectares et plus) obtenues à partir de données Sentinel 1 et 2	13
Figure 5 – Phénomène de retrait-gonflement.....	14
Figure 6 – Variations du front de saturation des sols et impacts sur les mouvements du sols ..	15
Figure 7 – Exemples de désordres (CEBTP, 1991)	16
Figure 8 – Mesures de prise en compte du retrait-gonflement des argiles (www.georisques.gouv.fr)	16
Figure 9 – Convention type de mise à disposition de site (à droite) / Emprise des sites (à gauche)	17
Figure 10 – Schéma type de l’instrumentation retenu par site	18
Figure 11 – Photographie des matériels implémentés	19
Figure 12 – Détail des données acquises et nomenclature retenue (FONDASOL)	20
Figure 13 – Exemple d’accès à la plate-forme de mesure	21
Figure 14 – Données pluie, teneur en eau et déplacement à 3 profondeurs sur la période d’observation (09/2021 → 09/2022) pour la ligne ‘01’ (site de Labège).....	22
Figure 15 – Données pluie, teneur en eau et déplacement à 3 profondeurs sur la période d’observation (09/2021 → 09/2022) pour la ‘ligne ‘02’ (site de Labège).....	23
Figure 16 – Corrélation entre mesures de déplacement et de teneur en eau (09/2021 → 09/2022) pour la ‘ligne ‘02’ (site de Labège)	24
Figure 17 – Ordre de grandeur de tassement différentiel unitaire et conséquence pour les bâtiments fondés superficiellement (Mouroux et al. 1988).....	25
Figure 18 – Exemples de désordres (CEBTP, 1991)	26
Figure 19 – Exemples de désordres	26
Figure 20 – Cycle de la gestion des risques (et des crises).....	26
Figure 21 – Schéma RGA (à gauche) ; calcul du retrait linéaire (à droite).....	28
Figure 22 – Evolution des mouvements verticaux en fonction des variations de teneur en eau (sol homogène)	29
Figure 23 – Calcul de l’amplitude de tassement en fonction des variations de teneur en eau ..	29
Figure 24 – Carte du retrait linéaire à l’échelle régionale (échelle discrète) avec prise en compte de la lithologie des sols et report des sinistres recensés (points noirs)	30
Figure 25 – Indice communal de retrait linéaire pour l’Occitanie	31

Figure 26 – Comparaison des mesures de teneur en eau mensualisées à Mormoiron (BRGM) et de l'indice SWI à Carpentras (Météo-France), BRGM RP-57011-FR	32
Figure 27 – Comparaison des mesures de teneur en eau journalières à Chaingy (Loiret) (BRGM) et de l'indice SWI (Météo-France)	32
Figure 28 – Comparaison des mesures de déplacement et de l'indice SWI (Météo-France) à Mormoiron (Vaucluse) BRGM RP-57011-FR	33
Figure 29 – Exemple de donnée SWI valorisée avec report des période de CATNAT sécheresse géotechnique	33
Figure 30 – Calcul du SWI communal et exemple sur Narbonne (Aude)	34
Figure 31 – Répartition du nombre d'arrêtés CatNat (à gauche) et durée cumulée CatNat (à droite) en Occitanie	34
Figure 32 – Répartition temporelle : durée des périodes CatNat par année de début.....	35
Figure 33 – Calcul des pseudo-tassement (exemple commune de Calvisson, Gard)	36
Figure 34 – Analyse comparative entre valeur de RL en laboratoire et les valeurs RL déduite de mesures in-situ (Chrétien, 2010)	36
Figure 35 – Processus de calcul : pseudo-tassement en fonction du temps	37
Figure 36 – Proposition de seuils en fonction de la distribution des pseudo-tassements à l'échelle régionale	37
Figure 37 – Analyse spatio-temporelle de l'aléa RGA (année 2003) à partir des algorithmes produits dans le cadre du projet VISEGEO	38
Figure 38 – Comparaison de mesures de déplacement vertical in situ (extensomètre EXT1 and EXT2) et du déplacement vertical mesuré par INSAR (trace ascendante et descendante Sentinel-1).....	39
Figure 39 – Traitement donnée INSAR et comparaison avec variation du SWI (reflecteur JIWITNU sur Calvisson, Gard)	40
Figure 40 – Exemple de chronique récente EGMS caractéristique de phénomène RGA (gonflement en fin de période hivernale et tassement jusque automne et amplitude annuelle variable)	40
Figure 41 – Effet cumulatif des déformations en amplitude suite à des sécheresse cumulées (déformations sur 2 m d'épaisseur du sol argileux entre 2008 et 2014, adapté de Chrétien, 2010)	41
Figure 42 – Principes de gestion du risque selon seuils de vigilance définis dans VISEGEO....	45
Figure 43 – Chaîne organisationnelle VISEGEO	46
Figure 44 – Transmission d'information VISEGEO	47
Figure 45 – Capture d'écran film VISEGEO	49

1. Introduction

Le projet VISEGEO est mené conjointement par le BRGM, PREDICT et GEOSEC. Ce projet soutenu par la Région Occitanie-Pyrénées-Méditerranée et l'Europe (FEDER), dans le cadre de l'appel à projet READY'NOV, et le Ministère de l'Écologie vise à définir une amélioration de la prévention du risque RGA dont les impacts sont financièrement très élevés au niveau national (2^{ème} poste d'indemnisation Cat Nat après les inondations).

Le projet est structuré en neuf lots dont sept lots techniques (L1 à L7, Figure 1) :

Lot	Taches	Leader Partenaires associés	Durée
0	Coordination, management projet	Tous les partenaires	T0 à T0+36
1 D1	État de l'art phénomène retrait gonflement argile	BRGM avec Predict, Géosec	T0 à T0+3
2 D2	Etude paramétrique multi facteurs	BRGM avec Predict, Géosec	T4 à T15
3 D3	Instrumentation sites pilotes (Gard – Haute-Garonne)	Géosec avec BRGM	T0 à T0+36
4 D4	Cartographie dynamique	Predict avec BRGM	T0+13 à T0+29
5 D5	Dispositifs opérationnels de gestion	Géosec avec BRGM	T0+06 à T0+30
6 D6	Pilote solution intégrée avec tests qualitatifs	Géosec avec BRGM, Predict	T0+25 à T0+36
7	Finalisation, optimisation solution ViSéGéo et premier déploiement	Predict	T0+18 à T0+36
8	Valorisation résultats, communication	Tous les partenaires	T0+3 à T0+36

Figure 1 – Structuration générale du projet

Les livrables techniques attendus sont au nombre de six (D1 à D6), principalement en fin des lots de travaux. Ils sont marqués par le développement d'un outil opérationnel basé sur des analyses physiques de comportement des sols sensibles au phénomène de retrait-gonflement, afin de créer une couche spatiale caractérisant l'aléa sécheresse en temps réel.

Le BRGM, outre la réalisation de l'état de l'art (D1), a réalisé des analyses spécifiques sur la caractérisation spatio-temporelle de l'aléa sécheresse en intégrant les chroniques historiques Météo-France mises à dispositions par PREDICT (D2, D4, D5). Par ailleurs le BRGM a instrumenté deux sites pilotes à l'échelle réelle (D3) pour la création d'indicateurs visant à caractériser le RGA temps réel (Labège et Cornebarrieu, 31). Le 1^{er} déploiement de VISEGEO est assuré par PREDICT (D6). En matière de communication un film sur le projet a été porté par le BRGM (<https://veille-eau.com/videos/visageo-la-solution-integree-vigilance-secheresse-geotechnique>).

2. Etat de l'art (D1)

Les caractéristiques de la structure interne des minéraux argileux constitutifs d'un sol expliquent leur comportement face aux variations de teneur en eau : leur structure « en feuillets » favorise la captation d'eau et le relargage de molécules d'eau qui engendrent des variations de volumes et donc des tassements / gonflements du sol. Les infrastructures (routes et habitations – pavillonnaires principalement) sont impactées par ces déformations du sol. On parle de « sécheresse géotechnique » ou « retrait-gonflement des sols argileux (RGA) ».

L'état de l'art sur le sujet a fait l'objet du rapport BRGM RP-71773-FR (avril 2022). Ce document (D1) dresse un état de l'art sur la connaissance, la caractérisation et les impacts de ces phénomènes. Dans un second temps sont abordés les moyens d'appréhender des critères pertinents pour qualifier le phénomène de retrait-gonflement à différentes échelles. Enfin, les solutions de gestion du risque sont listées, solutions en phase préventive (avant construction), basées sur une compilation des guides et recommandations existants mais également en phase curative sur le bâti existant, affecté à un niveau plus ou moins avancé.

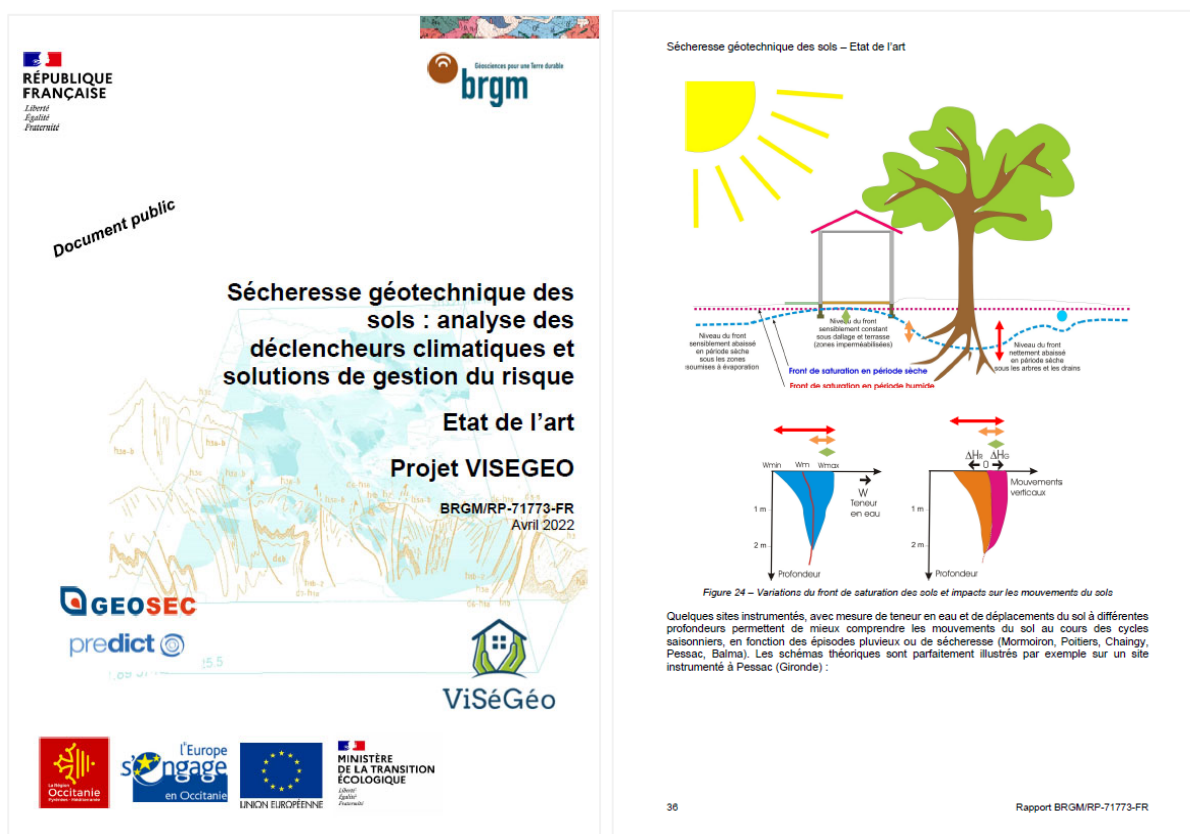


Figure 2 – Etat de l'art, extrait du rapport BRGM RP-71773-FR

2.1. SECHERESSE

La sécheresse est un événement climatique exceptionnel et naturel, caractérisé par un déficit en eau sur une période plus ou moins longue, qui dépend fortement des conditions locales (climat,

type de végétation, etc.). C'est un déficit en eau anormal (déficit hydrique) dans une ou plusieurs parties du cycle hydrologique terrestre.

La sécheresse qualifie le manque d'eau. Les températures élevées accentuent l'évaporation de l'eau et donc la sécheresse des sols. En retour, la plus faible quantité de vapeur d'eau dans l'air favorise son échauffement. Une sécheresse se caractérise dans les trois dimensions suivantes :

- Les niveaux du cycle hydrologique (précipitations, humidité du sol, débit),
- Une dimension temporelle,
- Une dimension spatiale.

On distingue quatre types de sécheresse : météorologique, agricole, hydrologique et géotechnique. Si ces distinctions sont toujours liées à des déficits pluviométriques, les moyens de caractérisation diffèrent selon les types. **Le projet VISEGEO s'intéresse à la sécheresse géotechnique.**

La sécheresse géotechnique est une période de durée variable, caractérisée par un déficit pluviométrique se traduisant par une diminution de la teneur en eau du sous-sol. Le sol argileux présente la particularité de voir sa consistance se modifier en fonction de sa teneur en eau. Dur et cassant lorsqu'il est sec, il devient plastique et malléable à un certain degré d'humidité. Ces modifications de consistance peuvent s'accompagner de variations de volume : fortes augmentations de volume (phénomène de gonflement) lorsque la teneur en eau augmente et, inversement, rétractation (phénomène de retrait) en période de déficit pluviométrique marqué.

La sécheresse géotechnique s'intéresse à l'aléa retrait-gonflement des argiles (RGA). Il ne s'agit donc pas des dommages causés aux cultures agricoles, ni des seules conséquences du déficit de la ressource en eau, mais bien de ceux résultant de plusieurs facteurs tels que la nature géologique du sol, le contexte hydrogéologique, les conditions climatiques, les défauts de construction et d'autres facteurs anthropiques (DGALN, 2007). Le phénomène de retrait-gonflement des argiles affecte les bâtiments et les ouvrages, en particulier ceux présentant des défauts de conception, de fondation ou de structure, ou un environnement défavorable tel que la présence de végétation à proximité (AQC, 2014). En France, en 2019, 2 347 communes ont été reconnues en état de catastrophe naturelle au titre de la sécheresse géotechnique.

Diverses approches d'évaluation de l'humidité des sols, à différentes échelles, existent et sont présentées dans le rapport (Figure 4).

Météo-France (Soubeyroux et Blanchard, 2008) a adapté le modèle hydrométéorologique spatialisé Safran-Isba-Modcou (SIM)¹ pour évaluer l'état de la réserve hydrique des sols et calculer un indice d'humidité du sol (*soil wetness index* SWI). Ce modèle utilise les données de précipitations issues d'un réseau dense de stations météorologiques (4 000 stations de pluie quotidienne) permettant de diagnostiquer la teneur en eau des sols avec une résolution très supérieure (maillage carré de 8 km de côté).

¹ SAFRAN : Système d'analyse du forçage atmosphérique ; ISBA : Interactions sol-biosphère-atmosphère ; MODCOU : Modèle hydrologique couplé surface-souterrain. Le modèle numérique Safran effectue une ré-analyse atmosphérique. Ces données alimentent ensuite le modèle Isba qui simule les échanges d'eau et d'énergie entre la surface du sol, la végétation et les basses couches de l'atmosphère, ainsi que le modèle Modcou qui simule le transfert de l'eau vers/dans les rivières et l'évolution des nappes aquifères.

L'indice SWI, est estimé et cartographié quotidiennement ainsi que son écart par rapport à la climatologie du modèle SIM. La combinaison des deux cartes est valorisée lors des comités sécheresse.

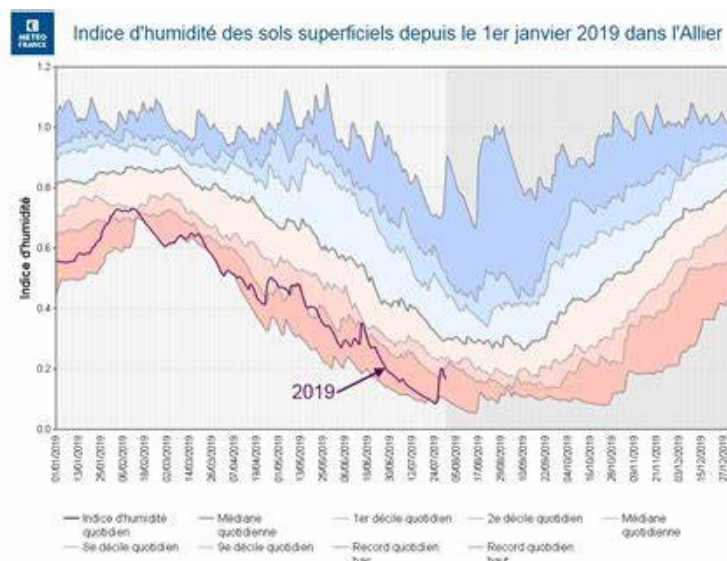
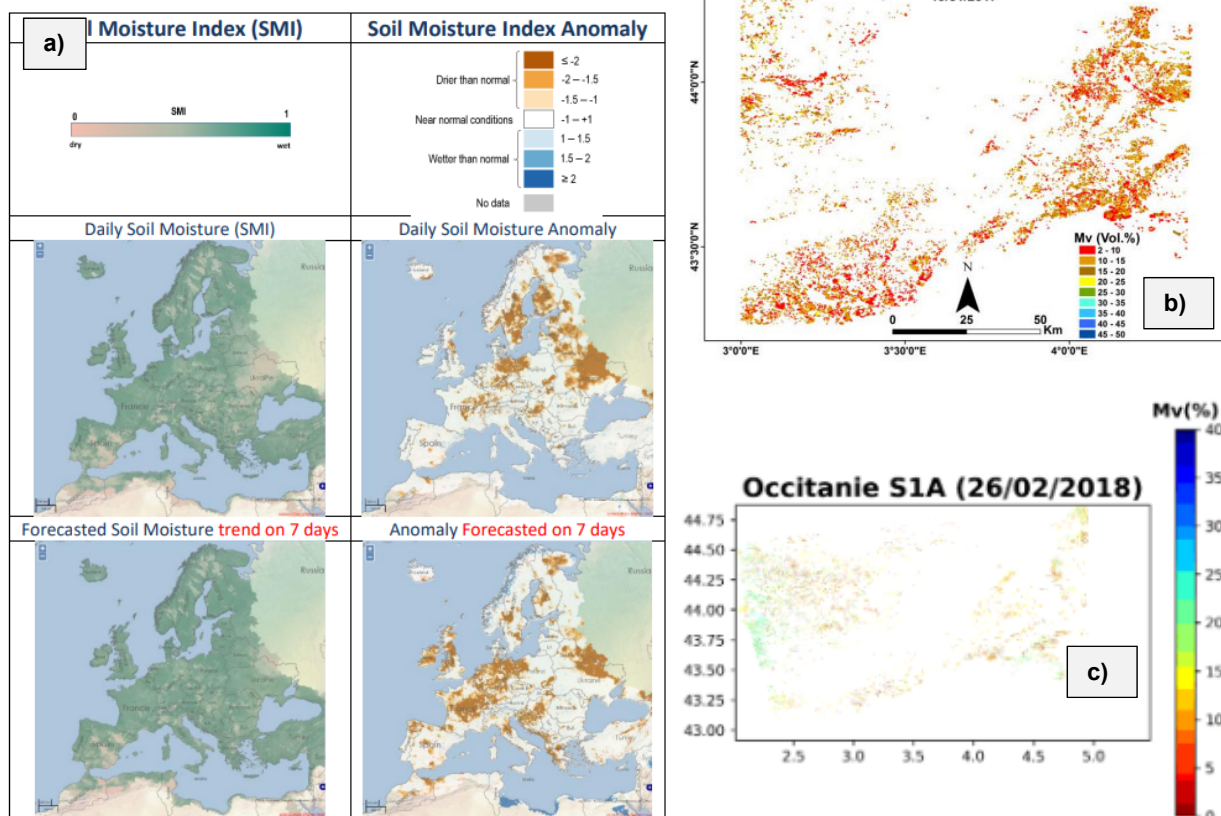


Figure 3 - Indicateur SWI, variations saisonnières



2.2. MECANISME RGA

Le matériau argileux présente la particularité de voir sa consistance se modifier en fonction de sa teneur en eau. Dur et cassant lorsqu'il est sec, un certain degré d'humidité le fait se transformer en un matériau plastique et malléable. Ces modifications de consistance peuvent s'accompagner, en fonction de la structure particulière de certains minéraux argileux, de variations de volume plus ou moins conséquentes : fortes augmentations de volume (phénomène de gonflement) lorsque la teneur en eau augmente et, inversement, rétractation (phénomène de retrait) lorsque la teneur en eau diminue.

Les phénomènes de capillarité, et surtout de succion, sont à l'origine de ce comportement. Les **variations de volume des sols argileux répondent donc à des variations de teneur en eau**. Pour une variation de teneur en eau identique, l'importance des variations de volume d'un sol argileux « gonflant » dépend aussi :

- Des caractéristiques « initiales » du sol, notamment la densité, la teneur en eau et le degré de saturation avant le début de l'épisode climatique (sécheresse ou période de pluviométrie excédentaire). Ainsi, l'amplitude des variations de volume sera d'autant plus grande que la variation de teneur en eau sera marquée. À ce titre, la succession d'une période fortement arrosée et d'une période de déficit pluviométrique constitue un facteur aggravant prépondérant ;
- De l'« histoire » du sol, en particulier de l'existence éventuelle d'épisodes antérieurs de chargement ou de dessiccation. Par exemple, un sol argileux « gonflant » mais de compacité élevée (sur-consolidation naturelle, chargement artificiel, etc.) ne sera que peu influencé par une période de sécheresse. À contrario, un remaniement des terrains argileux (à l'occasion par exemple de travaux de terrassement) pourrait favoriser l'apparition des désordres ou être de nature à les amplifier.

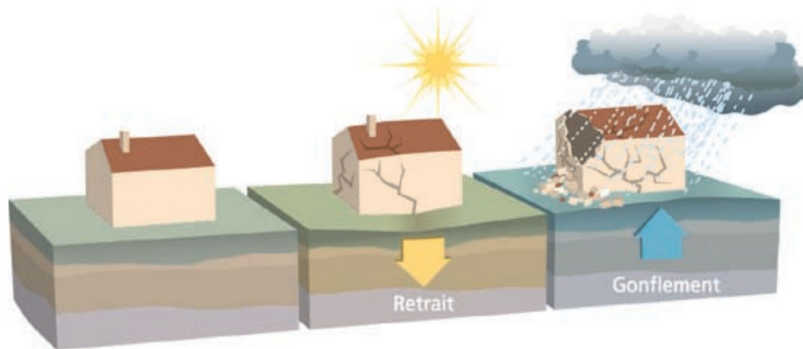


Figure 5 – Phénomène de retrait-gonflement

Les caractéristiques de la structure interne **des minéraux argileux** expliquent leur comportement face aux variations de teneur en eau : leur structure « en feuillets » favorise la captation d'eau et le relargage possible de molécules d'eau qui engendrent les variations de volumes.

Lorsque le sol argileux non saturé s'humidifie, il se sature sans changement de volume. Il en résulte une annulation progressive des pressions de succion jusqu'à ce que l'argile retrouve son volume initial, voire le dépasse. Divers paramètres, dont la nature minéralogique de l'argile, conditionnent l'ampleur de ce gonflement. Les déformations verticales (de retrait ou de gonflement) peuvent atteindre 10 % de l'épaisseur de sol considérée, voire dépasser cette valeur. Ces comportements sont illustrés à l'échelle d'un site par la Figure 6.

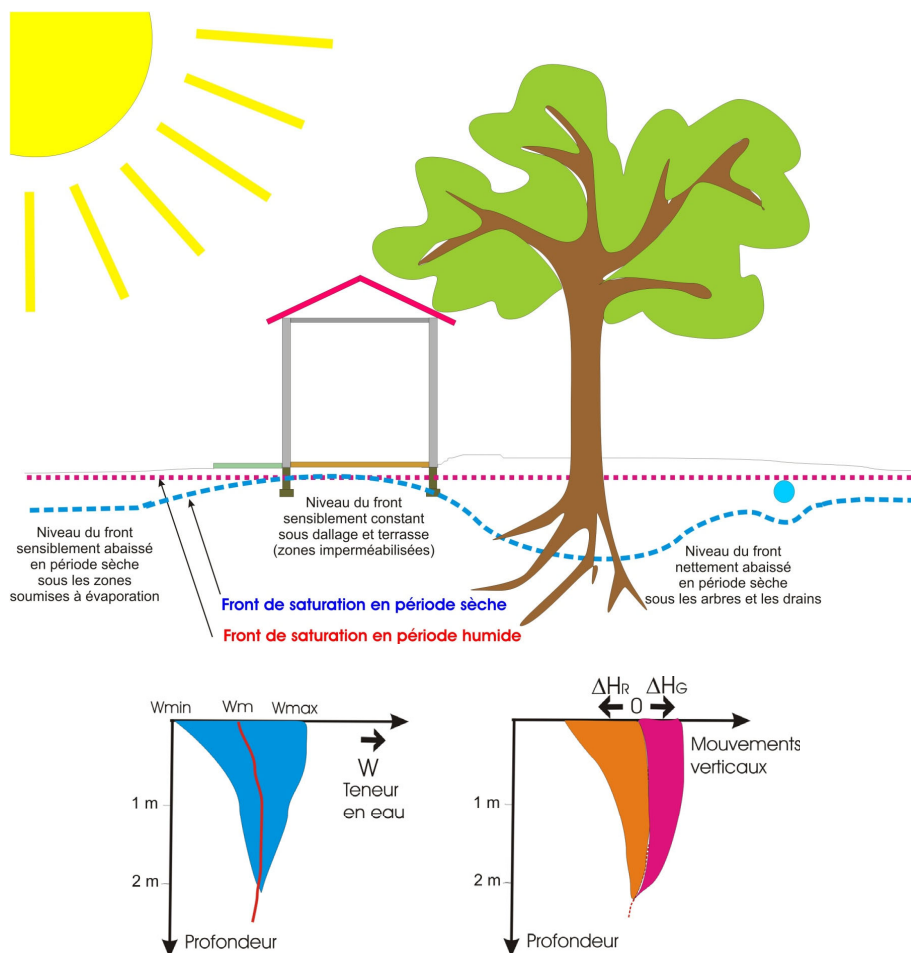


Figure 6 – Variations du front de saturation des sols et impacts sur les mouvements du sols

2.3. DOMMAGES ET IMPACTS

Les principales “victimes” du phénomène de la sécheresse géotechnique sont les maisons individuelles de plain-pied, souvent construites en dallage sur terre-plein avec des fondations sur semelles filantes continues ancrées peu profondément (de 0,40 m à 0,80 m) sur des sols argileux, dépourvues de joints de structure et d’une bonne rigidification de la structure (chaînages horizontaux) et le tout à proximité d’arbres isolés ou en haies.

Après une période de sécheresse ou de réhumidification des sols, on peut distinguer principalement sur un bâtiment les désordres suivants (Figure 7) :

- (a) fissuration structurelle : fissures verticales, horizontales, obliques ou dites- « en marches d’escalier ». Ces fissurations recoupent systématiquement les points faibles constitués par les ouvertures situées dans les murs, cloisons et plafonds ;
- (b) fissuration liée à la présence d’une lentille argileuse sous le bâti ;
- (c) fissuration liée à l’existence d’un sous-sol partiel en milieu argileux ;
- (d) fissuration liée à la présence d’une végétation trop proche d’un pignon ;
- (e) décollement des parties accolées au bâtiment principal : absence de joints de structure entre la partie principale et les annexes (garage, perron, terrasse, etc.) pouvant entraîner

également des ruptures au niveau des raccords de canalisation (réseau d'eau par exemple, très néfaste en milieu argileux).

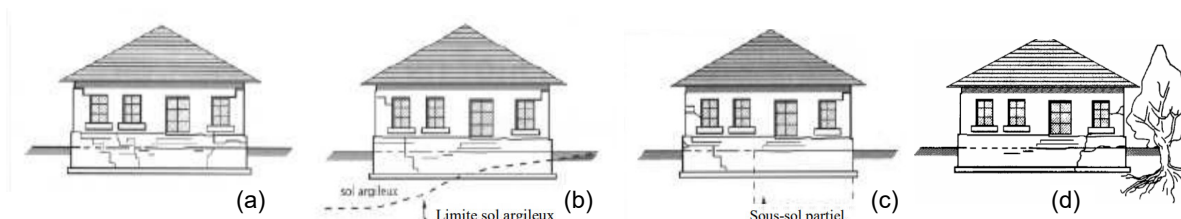


Figure 7 – Exemples de désordres (CEBTP, 1991)

2.4. SOLUTIONS DE GESTION DU RISQUE RGA

Le ministère de l'Écologie, lors de la réalisation des cartes d'aléa départementales, a produit une figure de synthèse des mesures globales à mettre en œuvre pour s'adapter au phénomène de retrait-gonflement. Cette figure largement relayée (guide technique) fournit des informations tant pour les constructions neuves que pour les bâtiments sinistrés :

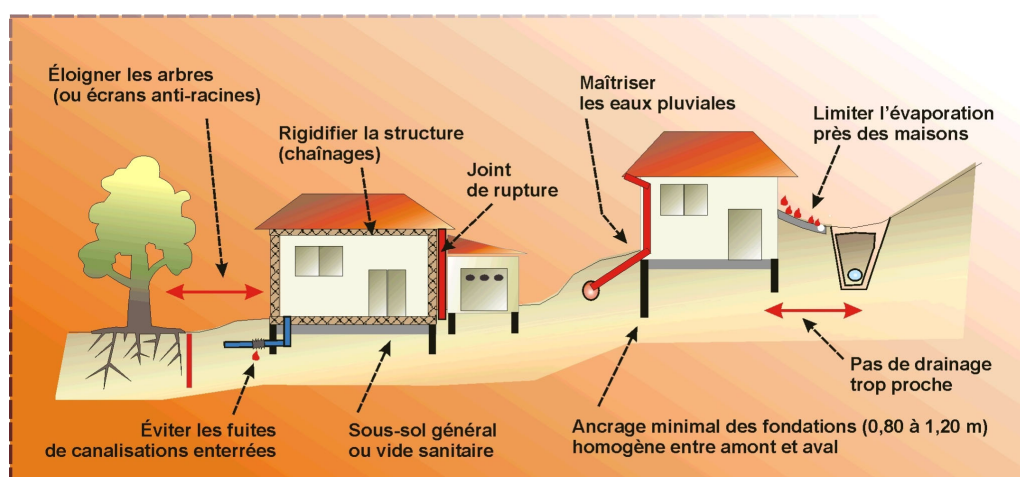


Figure 8 – Mesures de prise en compte du retrait-gonflement des argiles (www.georisques.gouv.fr)

Un dossier spécifique « Retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel », porté par le ministère de l'Écologie dresse un panorama structuré des actions envisageables. La synthèse se présente suivant dix fiches types qui précisent, outre l'objectif de la mesure et sa description, le niveau d'exigence attendu pour la réalisation en modulant le domaine d'application sur l'existant ou pour des constructions nouvelles.

A ce jour, la correcte mise en œuvre de la loi ÉLAN, qui passe notamment par un contrôle adapté, constitue l'élément central de la prévention du phénomène de RGA. Toutefois, ces mesures ne concernent que les constructions neuves et ne règlent pas le problème des maisons actuellement exposées au risque qui sont soit déjà fragilisées, et dont les communes n'ont pas été reconnues Cat Nat, soit potentiellement exposées.

3. Sites instrumentés (D3)

La réalisation de sites instrumentés a compris plusieurs tâches enchainées :

- Recherche de sites à partir d'enquêtes communales et sollicitations auprès de communes de la Région directement concernées par le phénomène, sur la base de critères décisionnels (accès, alimentation, parcelle publique, présence d'argile sensible au RGA) ;
- Réalisation d'investigations géotechniques spécifiques (sondages et prélèvements, mesure de teneur en eau, limites d'Atterberg, retrait linéaire) réalisées en sous-traitance ;
- Choix des sites et conventionnement pour la mise à disposition des terrains pour les installations (communes de LABEGE et CORNEBARRIEU – Haute-Garonne) ;
- Déploiement d'instrumentation suite à appel d'offre ;
- Valorisation des données.

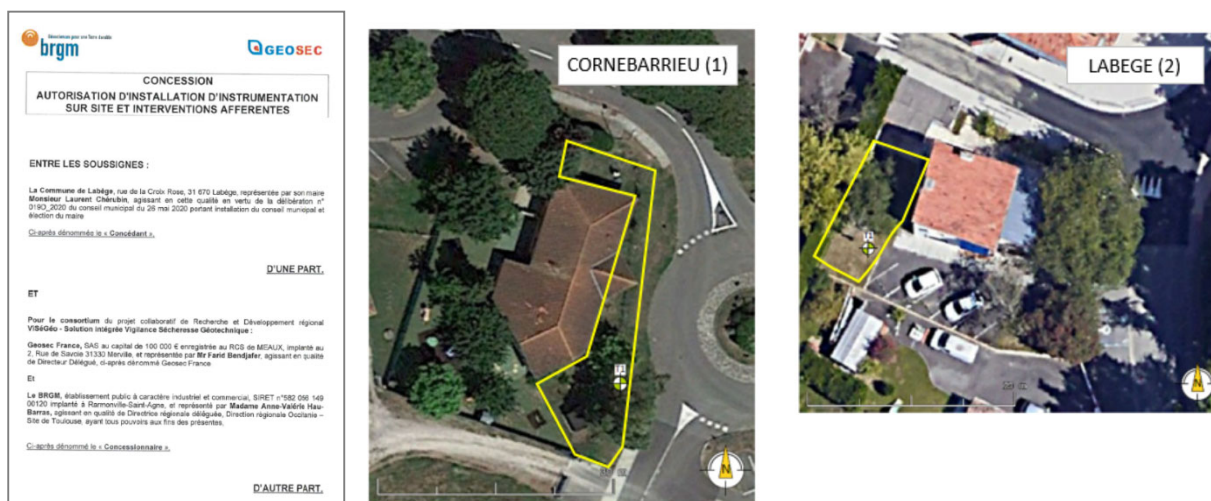


Figure 9 – Convention type de mise à disposition de site (à gauche) / Emprises des sites (à droite)

3.1. INSTRUMENTATION DES SITES

Le dispositif de monitoring retenu est le suivant :

- Installation d'une station unique météo pour les deux sites (site de Labège) ;
- Réalisation de forages pour mesures de teneur en eau (5 mesures entre 0 et 2 m) ;
- Réalisation de forages avec pose d'extensomètres verticaux pour mesures de déplacement verticaux sur les mêmes profils que les mesures de teneur en eau.

Les travaux, sous-traités à l'entreprise FONDASOL, se sont finalisés en septembre 2021 (Rapport du projet PR.DTIA.21.0003 – v1 – 21/10/2021) :

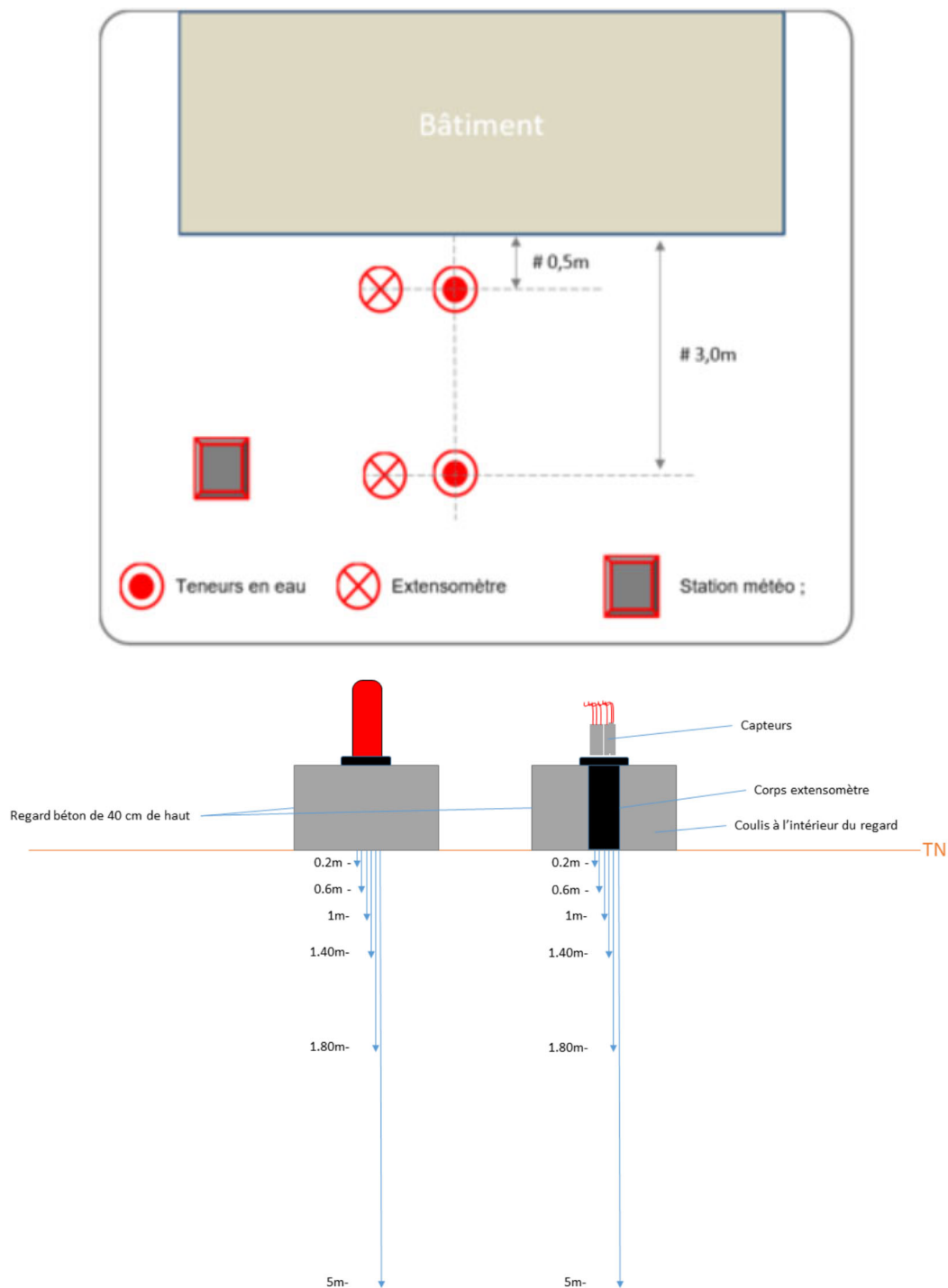


Figure 10 – Schéma type de l'instrumentation retenu par site



Figure 11 – Photographie des matériels implémentés

La Figure 12 précise les données acquises sur chacun des deux sites :

D.1. Sigle du capteur Météo

Les sigles utilisés sont :

- SlrFD_W : Densité du flux solaire (W/m^2)
- Rain_mm : Précipitations (millimètres)
- Strikes : Coups de foudre (Nombre)
- Dist_km : Distance moyenne des coups de foudre (km)
- VWS_ms : Vitesse du vent (mètres/seconde)
- WindDir : Direction du vent (degrés)
- MaxVWS_ms : Vitesse maximale du vent (mètres/seconde)
- AirT_C : Température de l'air (Deg C)
- VP_mbar : Pression de vapeur (mbar)
- BP_mbar : Pression barométrique (mbar)
- RH : Humidité relative (%)
- RHT_C : Température du capteur d'humidité relative (Deg C)
- TiltNS_deg : Inclinaison nord-sud (degrés)
- TiltVE_deg : Inclinaison ouest-est (degrés)

D.2. Sigle du capteur de teneur en eau

Les sigles utilisés pour les capteurs de teneur en eau sont :

- VWC_Xcm_[Numéro Ligne] : Teneur en eau volumétrique à X cm de profondeur (fractionnelle m^3/m^3 (c'est-à-dire que 0,20 correspond à 20 % de teneur en eau volumétrique))
- Ka_Xcm_[Numéro Ligne] : Permittivité (sans unité) à X cm de profondeur,
- T_Xcm_[Numéro Ligne] : Température (Deg C) à X cm de profondeur,
- BulkEC_Xcm_[Numéro Ligne] : Conductivité électrique (dS/m).

D.3. Sigle des extensomètres

Les sigles utilisés pour les extensomètres sont :

- EXT[Numéro Ligne]_Xm : Position de l'extensomètre (en mmm) à une profondeur de Xm. Exemple EXT01_1m80 représente la position du capteur extensomètre sur la ligne 1 à une profondeur de 1m80 ;
- EXT[Numéro Ligne]_Xm_T : Température de l'extensomètre (en °C) à une profondeur de Xm. Exemple EXT01_1m80_T représente la température du capteur extensomètre sur la ligne 1 à une profondeur de 1m80.

Figure 12 – Détail des données acquises et nomenclature retenue (FONDASOL)

Les données collectées sont accessibles via une interface qui permet la visualisation et le téléchargement des données :

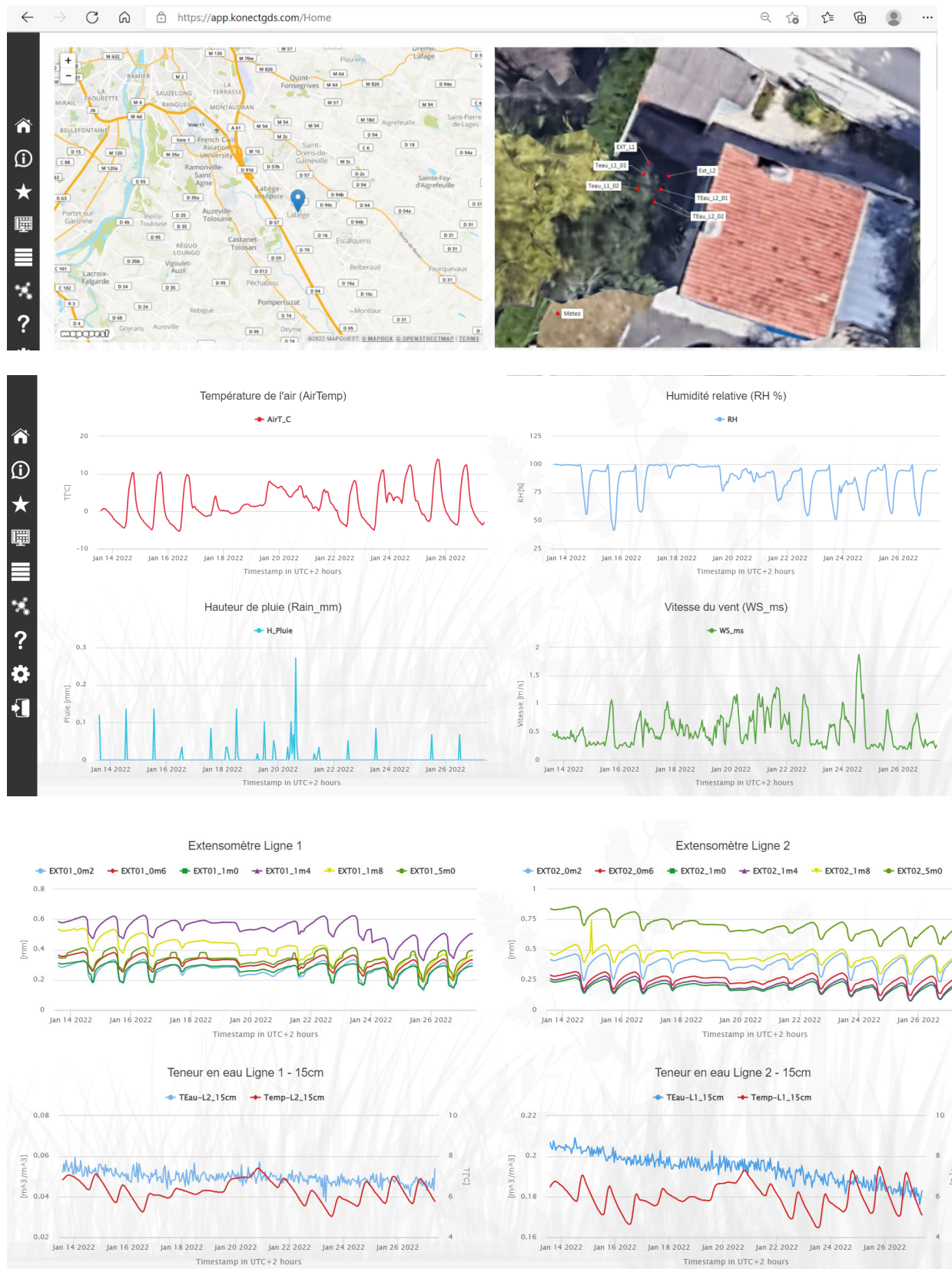


Figure 13 – Exemple d'accès à la plate-forme de mesure

3.2. VALORISATION DES DONNEES

La valorisation des données permet de mettre en relation des données de pluies, de déplacements et de teneur en eau à diverses profondeurs. Outre la valeur absolue des mouvements enregistrés en un point donné (XYZ), l'analyse des données permet de proposer des relations entre les trois variables acquises.

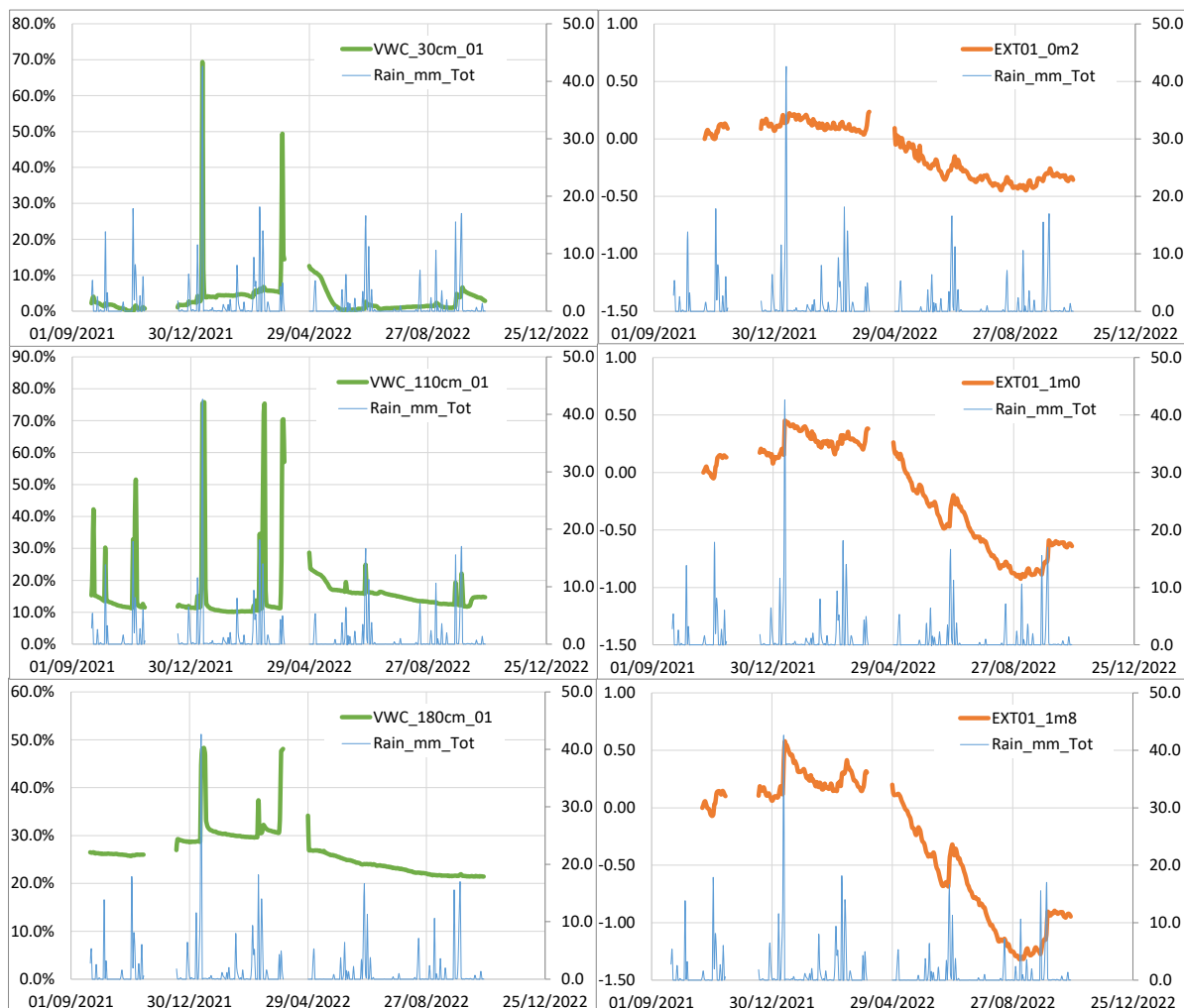


Figure 14 – Données pluie, teneur en eau et déplacement à trois profondeurs sur la période d'observation (09/2021 → 09/2022) pour la ligne '01' (site de Labège)

La réponse en « dirac » de la teneur en eau vis-à-vis de la pluviométrie est suspecte et témoigne *a priori* d'un contact localement défaillant entre sonde et terrain. On relève un accroissement des déformations en profondeur ce qui est *a priori* contraire à la physique des phénomènes dans le cas d'un sol homogène et laisse présumer d'une sensibilité au RGA supérieure en profondeur qu'en surface.

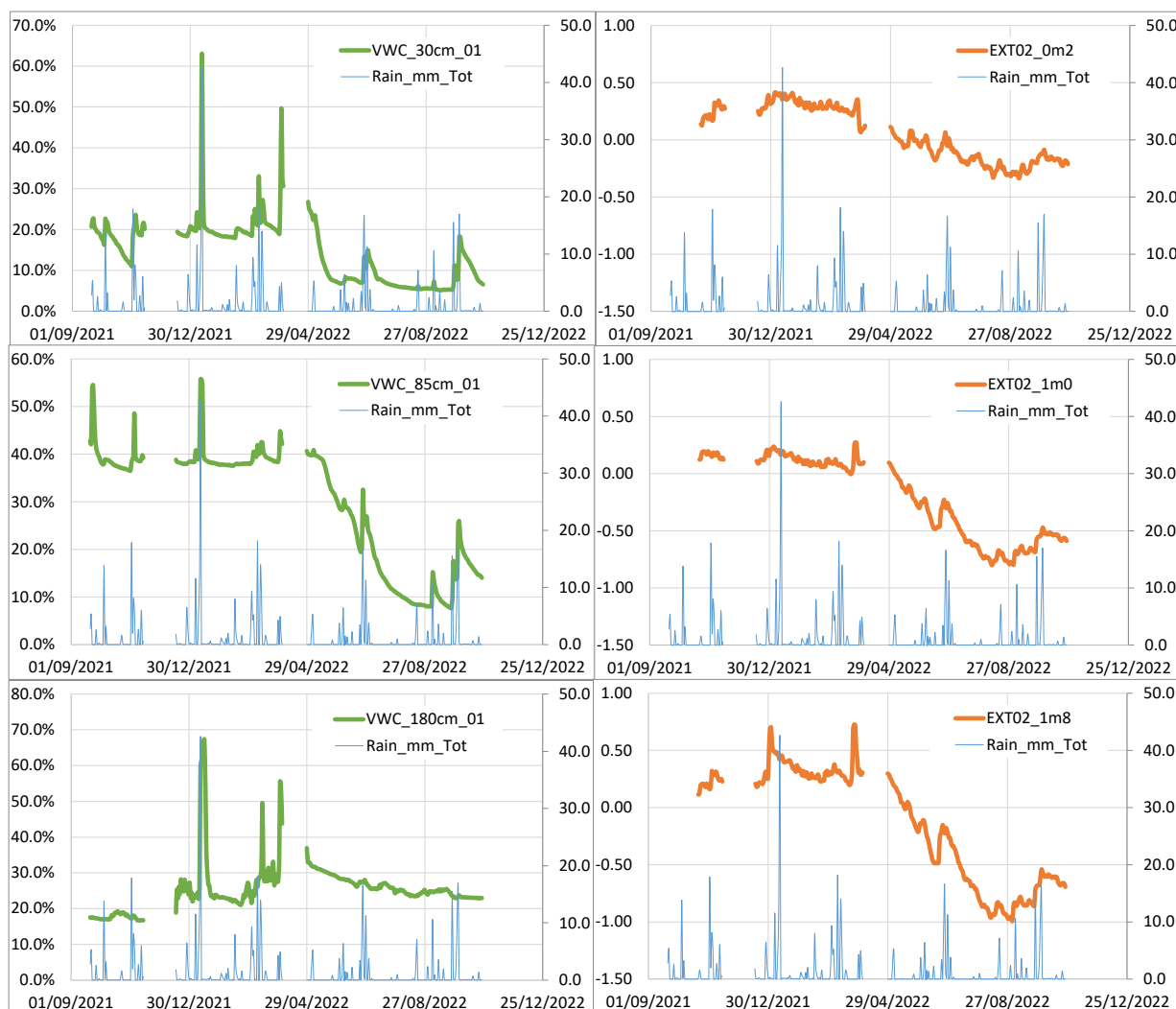


Figure 15 – Données pluie, teneur en eau et déplacement à trois profondeurs sur la période d'observation (09/2021 → 09/2022) pour la 'ligne '02' (site de Labège)

La recherche de corrélation entre pluie / teneur en eau et déplacement est réalisée pour les deux sites en considérant le taux de déformation moyen sur l'ensemble de la couche étudiée (2 m), en prenant en compte une teneur en eau moyennée sur différentes périodes et des cumuls de précipitations sur différentes périodes également.

Au final la meilleure corrélation est imagée par la déformation moyenne entre 0-2 m et la teneur en eau sur moyenne mobile à 30 j. Un exemple (Figure 16) est formulé sur la 'ligne 02' du site de Labège.

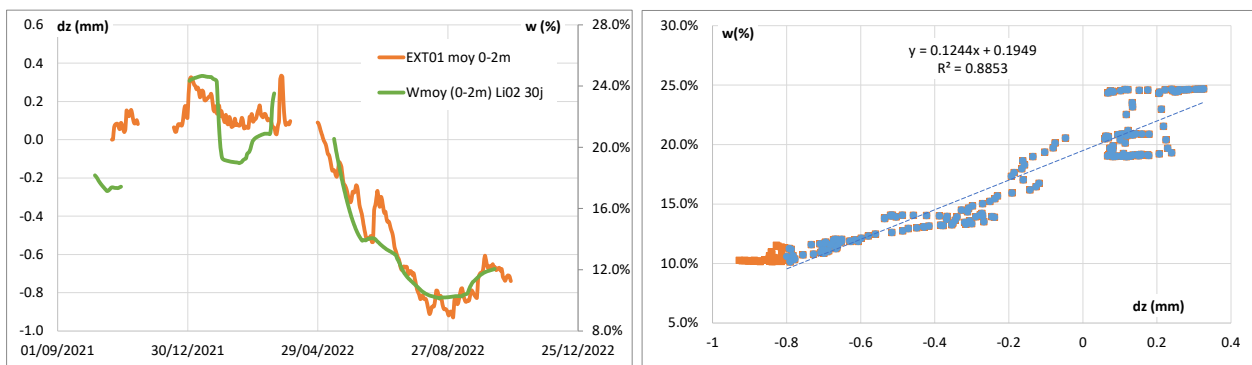


Figure 16 – Corrélation entre mesures de déplacement et de teneur en eau (09/2021 → 09/2022) pour la 'ligne '02' (site de Labège)

On relève que l'amplitude globale de déplacement (dh) locale est au maximum de 1,7 mm et l'amplitude moyenne sur la colonne de sol [0-2 m] de 1,4 mm. Cette valeur correspond à une variation de teneur en eau (dw) de l'ordre de 15%. Ce couple (dh , dw) correspondrait à une valeur de retrait linéaire *in situ* $RL_{in-situ}$ de 0,012 (voir § 4.3.1). On admet (Chrétien, 2010) que les valeurs *in situ* et laboratoire diffèrent d'un facteur 5 à 20 en fonction de la teneur effective en argiles sensibles au RGA dans une couche de sol (variable selon les matériaux naturellement). Cette prise en compte engendrerait un RL_{labo} équivalent compris entre 0,06 et 0,24 (valeurs de RL mesurées de l'ordre de 0,38).

Ces mesures ont vocation à continuer dans le temps, sur plusieurs cycles saisonniers.

4. Solution intégrée VISEGEO

4.1. ELEMENTS DE CONTEXTE DU DEVELOPPEMENT

Le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux constitue la 2^{ème} cause d'indemnisation au titre des catastrophes naturelles en France. Entre 1995 et 2014, les coûts cumulés s'élèvent à 362 millions d'euros / par an en moyenne pour la sinistralité sécheresse (données CCR - erisk.ccr.fr), et représente 38% des indemnisations (533 millions pour les inondations). L'année 2003 est une année exceptionnelle, enregistrant la sinistralité la plus importante à hauteur de plus de 2 milliards d'euros (12% de la sinistralité totale sur la période) dont plus de la moitié (58%) au titre de la sécheresse.

Pour la région Occitanie, on relève 2,12 milliards sur les exercices 1990-2013, soit 25% du coût total national, 88 millions par an en moyenne.

Dans un contexte de changement climatique global, il a été montré qu'une augmentation des coûts moyens annuels des dommages imputables au RGA était attendue dès l'horizon 2030 (entre 20 et 220%), estimée de 45 à 330% à l'horizon 2050 et multipliée par 3 à 6 d'ici la fin du siècle, selon les hypothèses de scénario retenues (Plat et al., 2009).

Comme signalé, le phénomène de retrait-gonflement des argiles est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux : ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse. Ces variations de volume induisent des tassements différentiels provoquant des dommages dans les constructions qui peuvent prendre plusieurs formes : fissurations en façade, décollements entre éléments jointifs (garages, perrons, terrasses), distorsion des portes et fenêtres, dislocation des dallages et des cloisons et, parfois, rupture de canalisations enterrées, etc. Les maisons individuelles sont les principales victimes de ce phénomène du fait de leur structure (légère et peu rigide, fondations superficielles). Sous une habitation, le sol est protégé de l'évapotranspiration, et sa teneur en eau varie peu dans l'année. De fortes différences de teneur en eau vont donc apparaître dans le sol au droit des façades. Une échelle spécifiquement proposée vis-à-vis de retrait-gonflement (Mouroux et al. 1988) précise l'ampleur des dommages en fonction des mouvements différentiels (Figure 17) :

<i>Valeur du mouvement différentiel unitaire</i>	<i>Désordres constatés</i>
1/1000	Fissuration des plâtres
1/600	Seuil de fissuration dans les structures type portique en B.A.
1/500	Limite pour les bâtiments où une fissuration n'est pas admissible
1/300	Limite à partir de laquelle commence la fissuration des murs porteurs sur semelles filantes
1/250	Fissuration des murs porteurs sur semelles continues, les poutres reposant sur semelles isolées
1/150	Fissuration importante dans les murs porteurs et dans les murs de remplissage en briques. Les poutres entre poteaux perdent de leur portance. Limite à partir de laquelle les dommages de structure deviennent très graves, pouvant parfois conduire à l'instabilité générale du bâtiment par rupture d'éléments porteurs.

Figure 17 – Ordre de grandeur de tassement différentiel unitaire et conséquences pour les bâtiments fondés superficiellement (Mouroux et al. 1988)

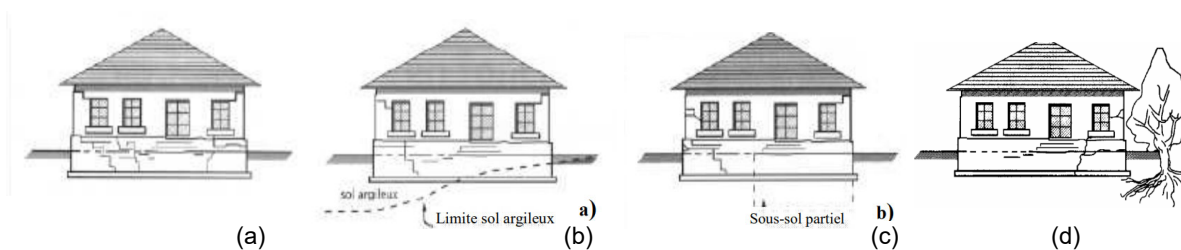


Figure 18 – Exemples de désordres (CEBTP, 1991)



Figure 19 – Exemples de désordres

La gestion des risques naturels est appréhendée par le cycle vertueux de la gestion des risques – et des crises, symbolisée ci-dessous et décrite par les phases de :

- Prévention (organisation, connaissance, préparation) ;
- Gestion de crise avec les réflexions sur l'anticipation ;
- Retours d'expérience permettant de faire évoluer les pratiques.



Figure 20 – Cycle de la gestion des risques (et des crises)

En cas de phénomènes hydrométéorologiques à risque, et notamment les inondations, des services sont proposés à tous les échelons du territoire pour analyser et assister les acteurs de la gestion des risques et des crises, avec pour optique finale une meilleure gestion du risque pour limiter les dommages et favoriser le retour à la normale.

En matière de retrait-gonflement des sols argileux, les approches opérationnelles actuelles favorisant une meilleure gestion du risque sont limitées à la phase de prévention, avec depuis 1997 un vaste projet de cartographie de l'aléa, engagé par le BRGM, sous l'égide du Ministère de l'Ecologie. Cette cartographie, réalisée à l'échelle départementale, caractérise les zones sujettes potentiellement au phénomène, sans prendre en compte le phénomène sécheresse proprement dit, facteur de déclenchement du phénomène. Sa déclinaison en Plan de Prévention des Risques « Sécheresse » (PPR) est réalisée localement sous l'impulsion des Préfectures concernées.

Par conséquent, les stratégies de gestion du risque sont basées sur des mesures d'adaptation pour les constructions nouvelles. Ainsi, en ce qui concerne les constructions de bâtiments sur des sols sujets au retrait-gonflement des argiles, le respect de quelques mesures simples permet d'éviter de futurs sinistres et n'entraîne qu'un surcoût modéré, de 3 à 8 %, du coût de la construction (Géosciences n° 3 ; Vincent (2006)). La gestion du risque sur les bâtiments existants se limite conformément à la doctrine nationale à « ne pas aggraver les vulnérabilités des biens exposés ».

En dehors de ces approches de gestion par la prévention, aucune stratégie n'est actuellement développée pour limiter les dommages en cas de survenance de crise « sécheresse », alors que les vigilances et alertes météorologiques se développent et que les outils de prévision des impacts de phénomènes climatiques se multiplient. Le projet proposé s'inscrit dans ce cadre et vise à combler ce manque en proposant une approche innovante de gestion du risque « retrait-gonflement des sols argileux » et le développement d'un outil spécifique pour une meilleure prise en compte de la sécheresse géotechnique : VISEGEO (vigilance sécheresse géotechnique)

4.2. ENJEUX ET OBJECTIFS DU PROJET

L'objectif du projet est de proposer des suivis d'évolution en temps réel des conditions de saturation des sols et de la criticité des mouvements différentiels potentiels selon la nature des formations géologiques présentes. En fonction de ces analyses, il est envisagé de proposer des réponses opérationnelles, graduées en fonction de l'ampleur de la crise constatée / attendue, à destination des citoyens potentiellement impactés.

Les contenus scientifiques et techniques du projet ont permis de développer des :

- Schémas de caractérisation spatio-temporelle de la sévérité de phénomènes de RGA ;
- Modes de transferts d'information vers les *end-users* du service ;
- Préconisations opérationnelles pour limiter / réduire les impacts du phénomène.

Les résultats du projet sont à destination :

- Des personnes potentiellement impactées ;
- Des donneurs d'ordre en matière de gestion des risques (collectivités et services de l'Etat) ;
- Des assureurs, principaux bailleurs de fonds des politiques de couverture financière en cas de sinistres.

4.3. SOLUTION TECHNIQUE PROPOSEE

La solution développée se base sur :

- Une étude paramétrique des facteurs climatiques, géologiques et géotechniques influençant l'apparition des phénomènes à partir d'une analyse statistique à l'échelle régionale, basée sur les retours d'expérience depuis 1989 (livrable D2 pilote BRGM) ;
- Le développement d'algorithmes de traitements spécifiques pour aboutir à des cartographies dynamiques de l'aléa sécheresse géotechnique et la définition des seuils (livrable D4 contribution forte BRGM) ;
- Le développement d'un catalogue de dispositions opérationnelles de réduction des aléas et/ou des vulnérabilités des infrastructures exposées (livrable D5 contribution forte BRGM) ;
- La mise en œuvre d'une maquette, pilote de la solution intégrée (livrable D6 contribution BRGM).

Un des principes que s'est imposé le consortium de projet est de bâtir un démonstrateur à l'échelle régionale Occitanie avec la perspective de transposition à d'autres territoires. Une des contraintes du projet a été de valoriser UNIQUEMENT des données accessibles sur l'ensemble du territoire.

4.3.1. Etude paramétrique (D2)

Sous une maison, l'évaporation ne peut se produire qu'en périphérie. Il apparaît un gradient entre le centre du bâtiment (équilibre hydrique) et les façades, et par suite des mouvements différentiels. Contrairement aux phénomènes de tassement par consolidation, les effets ne s'atténuent pas avec le temps mais augmentent quand la structure perd de sa rigidité. Le mécanisme de RGA est réversible (sensiblement), dépend de la variation de teneur en eau au cours du temps, sa sévérité peut être appréhendée à partir du retrait linéaire (RL) jusqu'à un seuil théorique de dessiccation. Le retrait linéaire correspond à la pente de la courbe de déformation du sol en fonction des variations de teneur en eau (Figure 21).

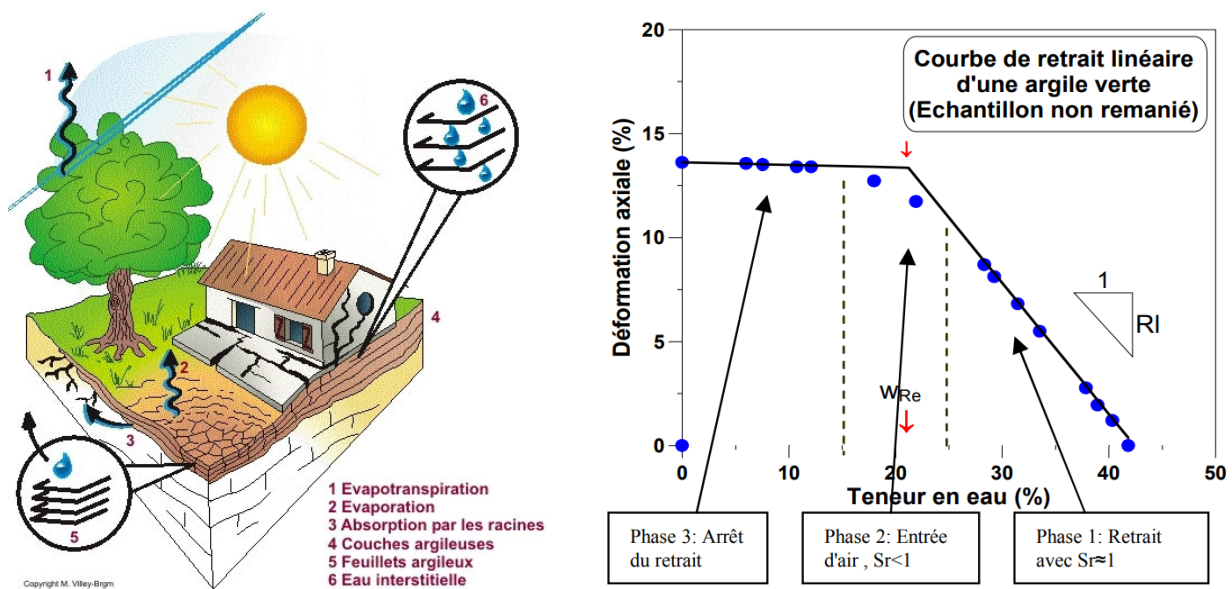


Figure 21 – Schéma RGA (à gauche) ; calcul du retrait linéaire (à droite)

L'approche VISEGEO est basée sur la valorisation de ce concept :

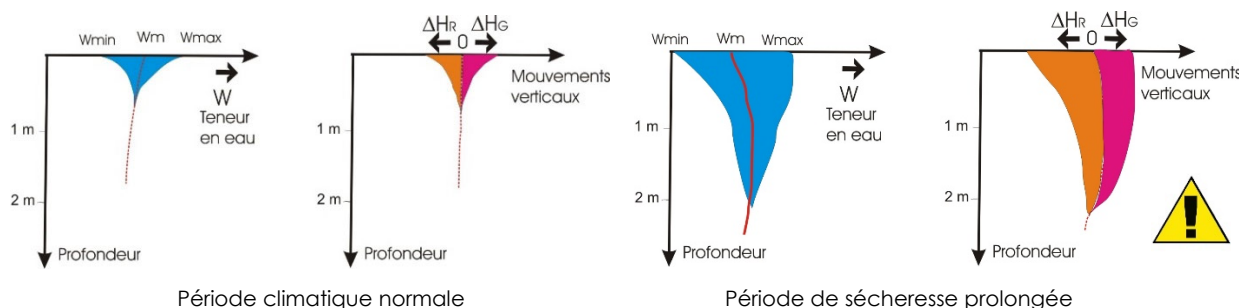


Figure 22 – Evolution des mouvements verticaux en fonction des variations de teneur en eau (sol homogène)

En période climatique normale, les variations de profil hydrique du sol (teneur en eau) sont saisonnières, impactent la tranche superficielle de sol et engendrent des mouvements de faible ampleur. En période de sécheresse prolongée (gradients d'évaporation), une plus forte profondeur de sol est affectée par variations de teneur en eau impliquant des mouvements résultants.

Les désordres au bâti dépendent directement des déformations à l'échelle de la parcelle. On admet que la fissuration structurelle apparaît dès le seuil de déformation de 1/250 (4 mm / 1 m) est atteint. Pour une habitation de 80 m² cela correspond à des tassements en périphérie d'environ 2 cm (§ 4.1).

Le concept est de caractériser un pseudo tassement spatialisé à l'échelle de la région Occitanie (zone pilote du projet) et évolutif dans le temps. Les données valorisées sont :

- FACTEUR DE PREDISPOSITION : le potentiel de retrait (RL) caractérisé à l'échelle de la Région par le BRGM dans la cadre des cartes d'aléa retrait gonflement réalisées entre 2005 et 2015 ;
- FACTEUR DE DECLENCHEMENT : la variation de teneur en eau au cours du temps, estimée à partir de l'indice SWI de Météo-France ;
- Pour la validation, la géométrie des formations impactées potentiellement évaluées à partir des REX de sinistres et une approche à partir des données d'interférométrie satellitaire (INSAR).

Le calcul de l'amplitude de tassement est réalisé à partir d'un modèle par couche (comme classiquement en géotechnique) :

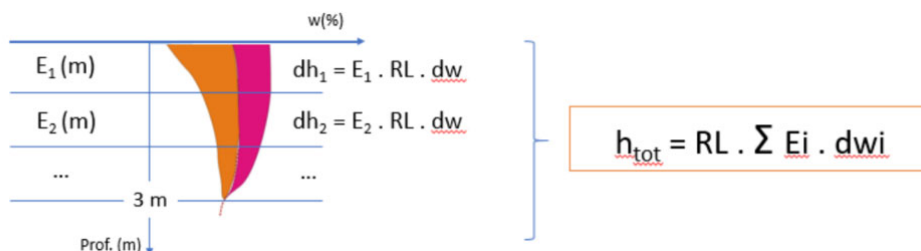


Figure 23 – Calcul de l'amplitude de tassement en fonction des variations de teneur en eau

Afin de résoudre l'approche à l'échelle régionale les hypothèses suivantes sont prises en considération :

- **Profondeur maximale de zone d'influence du RGA limitée à 3 m ;**

- **Prise en compte d'une diminution de la variation de teneur en eau avec la profondeur (loi linéaire) ;**
- **Variation de teneur en eau assimilée à la variation du SWI (calcul d'un « pseudo-tassement ») ;**
- **L'analyse est réalisée à l'échelle communale avec seule prise en considération des zones urbanisées.**

a) Données géotechniques régionales

Les données géotechniques régionales sont issues des cartes d'aléa réalisées à l'échelle départementale, échelle du 1 : 50 000^{ème}. Les formations géologiques sont caractérisées des points de vue lithologique, minéralogique et géotechnique. Seule la caractérisation géotechnique est considérée, mais des tests couplant les autres variables ont été engagés dans le cadre du projet.

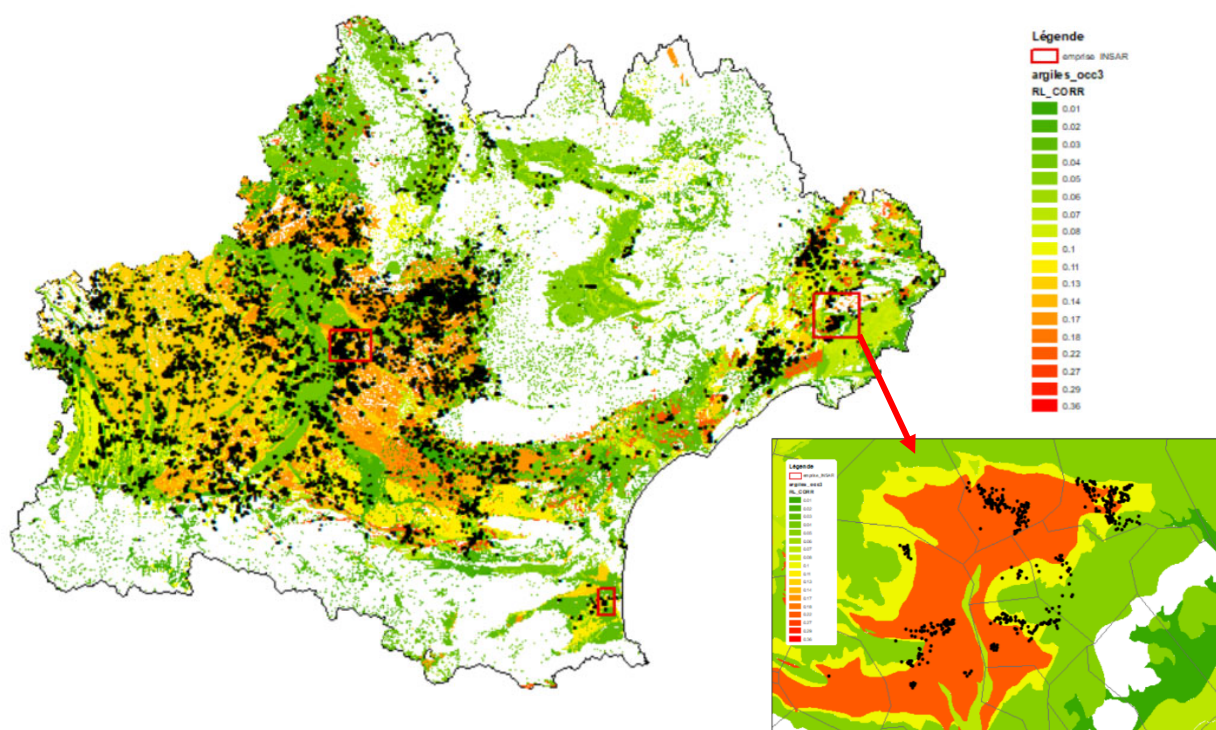


Figure 24 – Carte du retrait linéaire à l'échelle régionale (échelle discrète) avec prise en compte de la lithologie des sols et report des sinistres recensés² (points noirs)

Des approches multicritères ont été testées puis abandonnées pour caractériser cet indice. La construction d'un indice communal est réalisée en considérant **la valeur maximale du retrait linéaire au niveau des zones urbanisées** de la commune (avec seuil de 50 m x 50 m qui correspond à la précision du 1 : 50 000^{ème}). Cette approche (sécuritaire) ne présume pas de la répartition du bâti sur tel ou tel secteur de la commune. La donnée des zones urbanisées est celle décrite par la BD OcSOL Occitanie (www.openig.org).

² Les sinistres reportés sont issus des travaux de cartographie d'aléa RGA réalisé pour le compte du ministère de l'Ecologie entre 2003 et 2012 à l'échelle Occitanie (<https://infoterre.brgm.fr>)

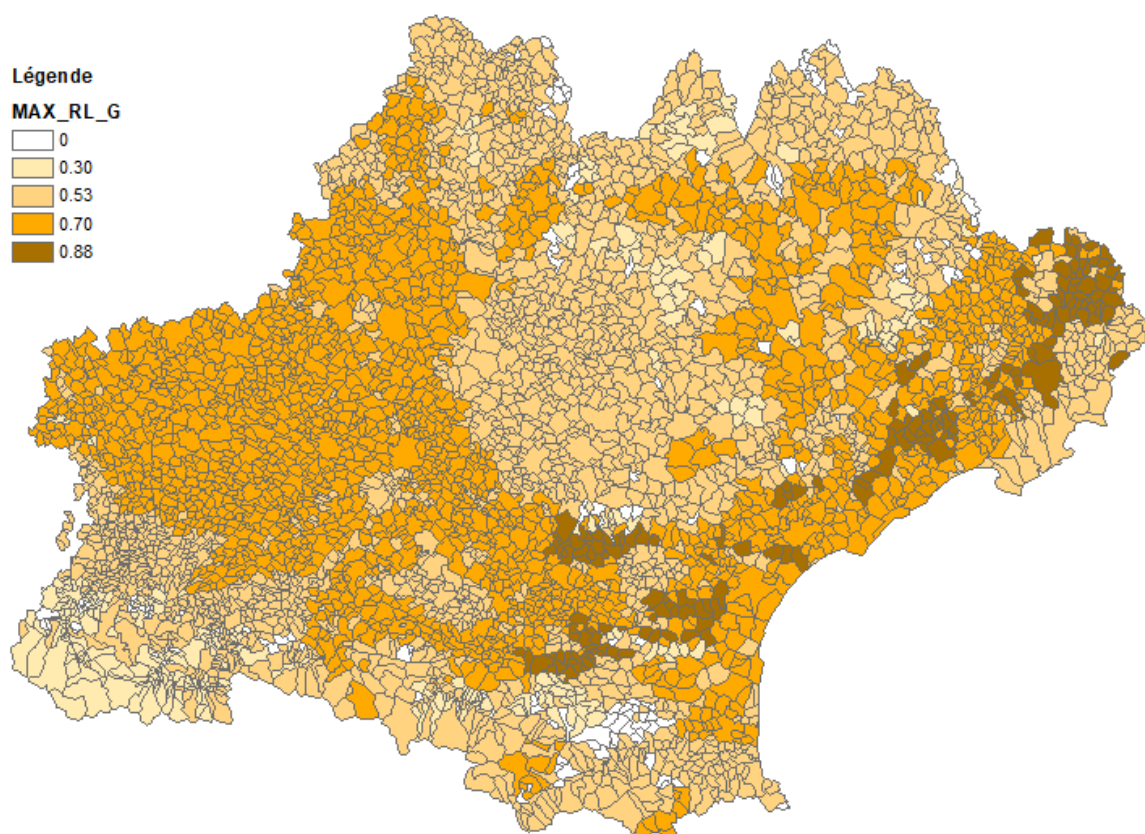


Figure 25 – Indice communal de retrait linéaire pour l'Occitanie

b) Variation spatiale et temporelle de teneur en eau

Les variations de l'humidité du sol commandent l'amplitude des déformations de retrait et de gonflement (si les conditions de susceptibilité sont réunies). Elles constituent le facteur de déclenchement. Les valeurs minimales et maximales de la quantité d'eau contenue dans le sol déterminent les bornes des variations possibles des déformations associées.

L'accès à une donnée spatiale et temporelle de la teneur en eau n'est possible que par la valorisation de modèles intégrateurs. Dans le cadre du projet, la variabilité spatio-temporelle de l'humidité du sol est évaluée à l'aide d'un modèle hydrologique à grande échelle (Isba), méthode qui a fait ses preuves, notamment aux États-Unis (voir par ex. Maurer et al., 2002; Sheffield et al., 2004). L'humidité du sol est représentée dans Isba par les contenus en eau des trois couches de sol. Ce contenu en eau est intégré sur la profondeur du sol puis adimensionalisé par les contenus caractéristiques du sol et de la végétation de la maille considérée pour calculer l'indice d'humidité du sol SWI (*Soil Wetness Index*) selon une formule donnée (§ 2.1). L'intérêt de cette donnée est qu'elle est continue spatialement, qu'elle couvre l'ensemble du territoire (maillage carré de 8 km de côté) et existe à différents pas temporels.

Dans le détail, l'indice d'humidité des sols (*Soil Wetness Index* SWI) caractérise le pourcentage d'eau du sol disponible pour la végétation :

$$SWI = \frac{W - W_{wilt}}{W_{fc} - W_{wilt}}$$

où W représente le contenu intégré en eau du sol, W_{wilt} le contenu en eau au point de flétrissement et W_{fc} le contenu en eau du sol à la capacité au champ.

Il permet d'évaluer l'état de la réserve en eau d'un sol par rapport à sa réserve optimale (réserve utile). Lorsque le SWI est voisin de 1, voire supérieur à 1, le sol est humide ou tend vers la saturation. Lorsque le SWI tend vers 0, voire passe en dessous de 0, le sol atteint un niveau de dessiccation de nature à provoquer un état de stress hydrique pour le couvert végétal.

La validité de prise en compte du SWI dans l'analyse repose sur des cas type répertoriés pour lesquels teneur en eau et SWI sont calculés :

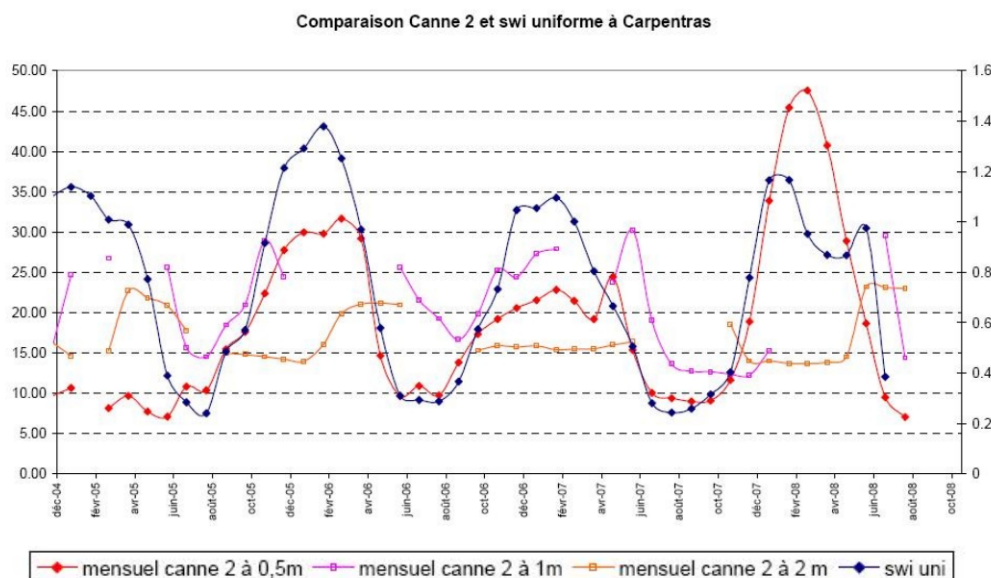


Figure 26 – Comparaison des mesures de teneur en eau mensualisées à Mormoiron (BRGM) et de l'indice SWI à Carpentras (Météo-France), BRGM RP-57011-FR

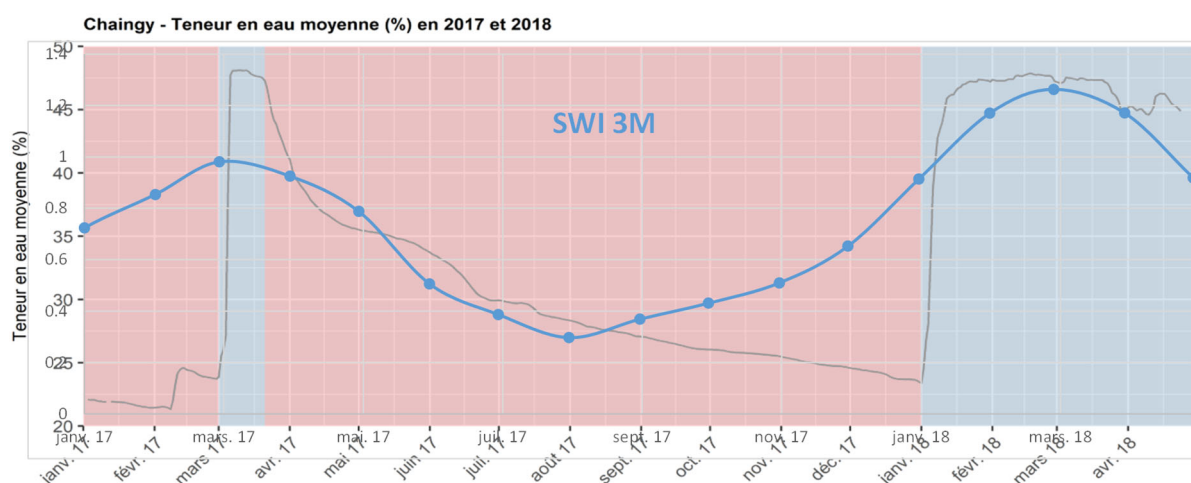


Figure 27 – Comparaison des mesures de teneur en eau journalières à Chaingy (Loiret) (BRGM) et de l'indice SWI (Météo-France)

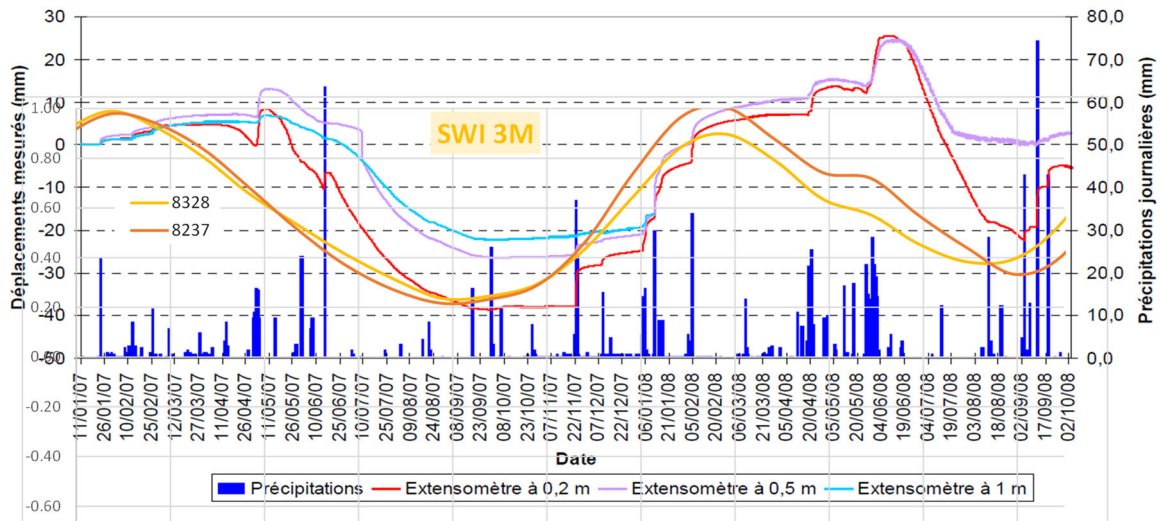


Figure 28 – Comparaison des mesures de déplacement et de l'indice SWI (Météo-France) à Mormoiron (Vaucluse) BRGM RP-57011-FR

Remarque importante : la donnée SWI disponible dans le cadre du projet est un indice SWI mensuel calculé à partir des SWI quotidiens moyennés sur les trois derniers mois.

On relève néanmoins, une adéquation entre SWI et teneur en eau (au lissage près naturellement), une **proportionnalité relative entre SWI et déplacement**, ce qui renforce le principe de valorisation du retrait linéaire pour spatialiser la prédisposition des sols au RGA.

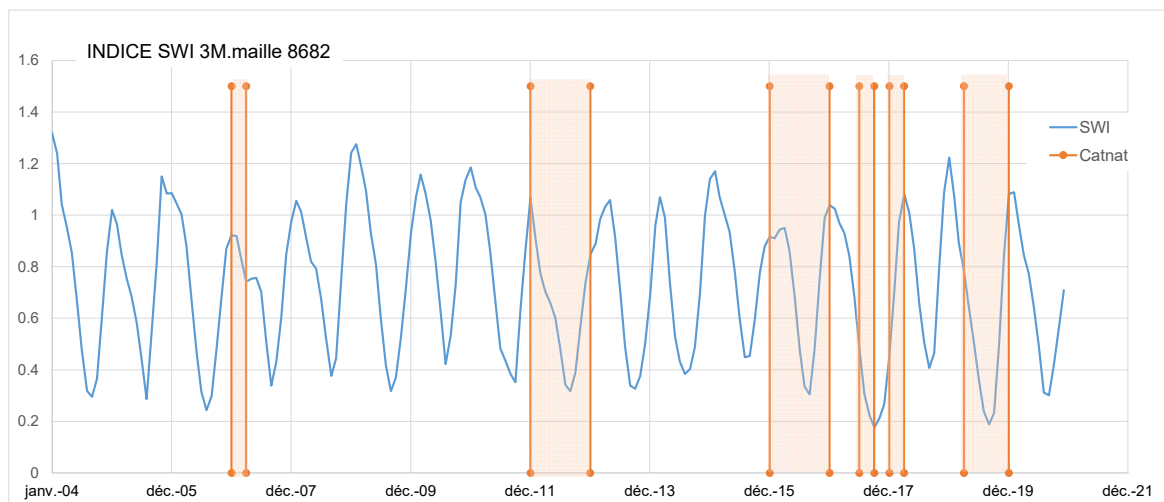


Figure 29 – Exemple de donnée SWI valorisée avec report des période de CATNAT sécheresse géotechnique

Comme pour le RL, un indicateur SWI est reconstitué à l'échelle communale en intégrant les variations du SWI par maille Safran au prorata des surfaces des zones urbanisées sensibles au RGA. Cette méthode impose un calcul régulier (mensuel) du SWI communal :

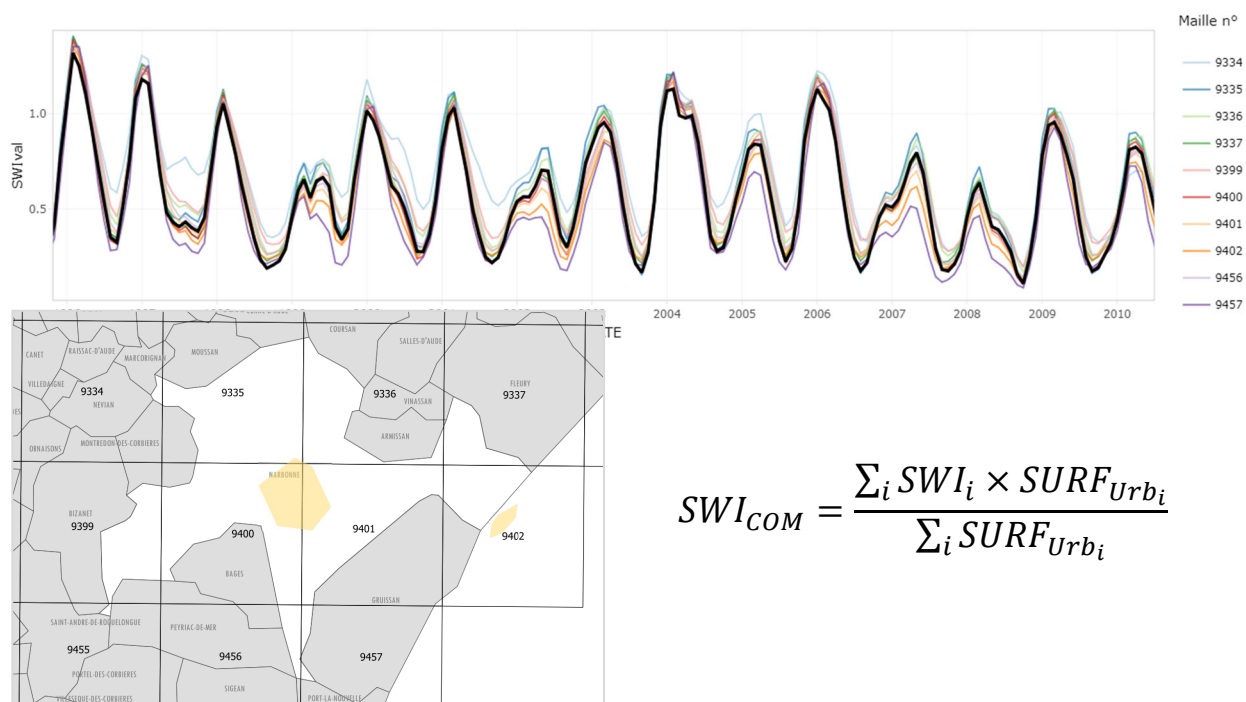


Figure 30 – Calcul du SWI communal et exemple sur Narbonne (Aude)

Au final le calcul pour les années passées est réalisé depuis 2000, date pour laquelle les données de sinistres sont consolidées et pour laquelle l'indicateur Cat Nat est cohérent avec les périodes de sécheresse (caractère saisonnier et durée limitée, Figure 31 et Figure 32).

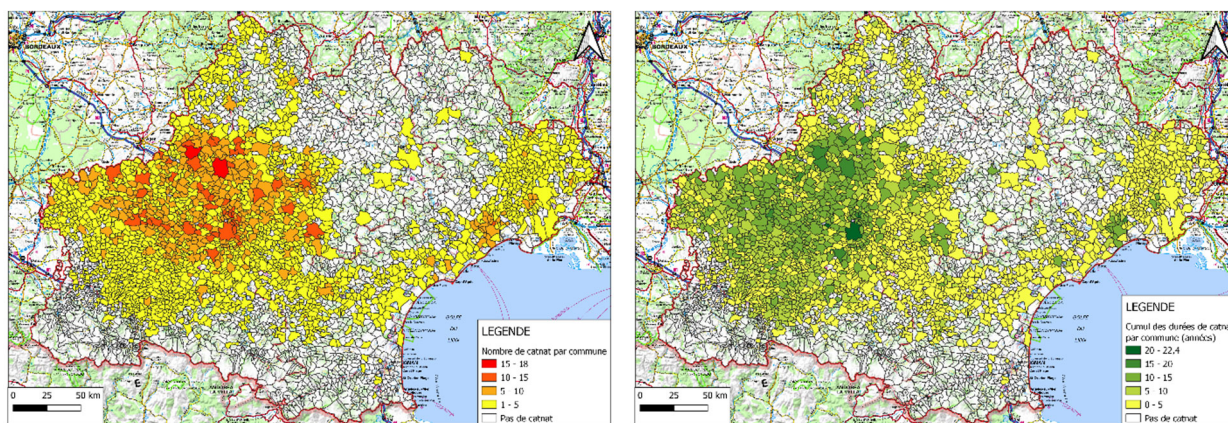


Figure 31 – Répartition du nombre d'arrêtés Cat Nat (à gauche) et durée cumulée Cat Nat en année (à droite) en Occitanie entre 1989 et 2020

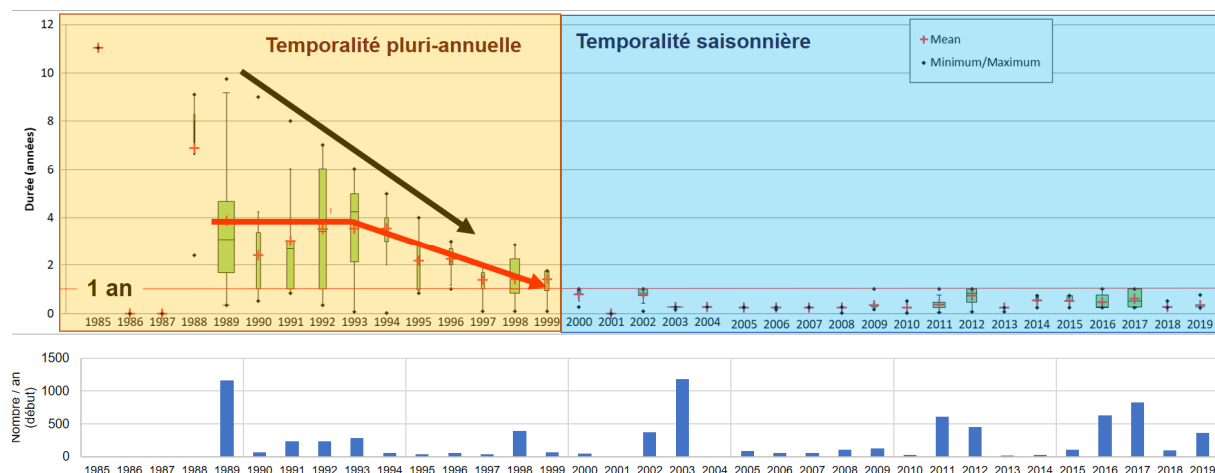


Figure 32 – Répartition temporelle : durée des périodes Cat Nat par année de début

On relève :

- Une tendance à la décroissance de la durée maximale des Cat Nat de 1985 à 1999 ;
- Un plateau dans les durées moyennes de 1985 à 1994 puis tendance à la décroissance jusqu'à 1999 (les années avant 1989 ne sont pas significatives, correspondant à la période mise en place du dispositif) ;
- Le passage à des durées de moins d'une année à partir de 2000 en relation avec les changements d'approche sur les critères de reconnaissance Cat Nat.

c) Evaluation spatiale et temporelle des déformations de sol

Le calcul de déformation de sol (en tassement) est réalisé à partir des indices SWI communaux (b) et de l'indice de retrait communal (a). Le principe de calcul s'appuie sur la relation entre retrait linéaire et variation de teneur en eau. Au cours d'un cycle humidité sécheresse on observe :

$$\left\{ \begin{array}{ll} dh/H = RL \, dw & \text{(définition du retrait linéaire)} \\ dw = \alpha \cdot dSWI & \text{(proportionnalité globale résultat des observations)} \end{array} \right.$$

donc $dh = H \cdot RL \cdot \alpha \cdot dSWI$ et $dh' = dh / (H \cdot \alpha) = RL \, dSWI$

avec :
 dh : tassement réel sur le cycle
 H : colonne de sol concernée par les variations de volume
 $dSWI$: variation de SWI sur la période
 RL : retrait linéaire
 dh' : pseudo-tassement sur le cycle

La Figure 33 présente un exemple d'analyse sur la commune de Calvisson (Gard) sur la période 2010-2019. A chaque cycle humidité-sécheresse, un pseudo-tassement (h') est calculé à l'échelle communale. On relève bien une variation de h' année après année qui intègre à la fois de la variation du SWI au cours du cycle (variable spatiale ET temporelle) et du RL (variable spatiale).

L'analyse de la distribution des pseudo-tassements annuels à l'échelle locale (communale) OU régionale permet de juger du caractère exceptionnel des déplacements calculés. On note bien que, plus que la valeur de SWI minimale, c'est l'amplitude de déformation annuelle qui importe dans l'analyse.

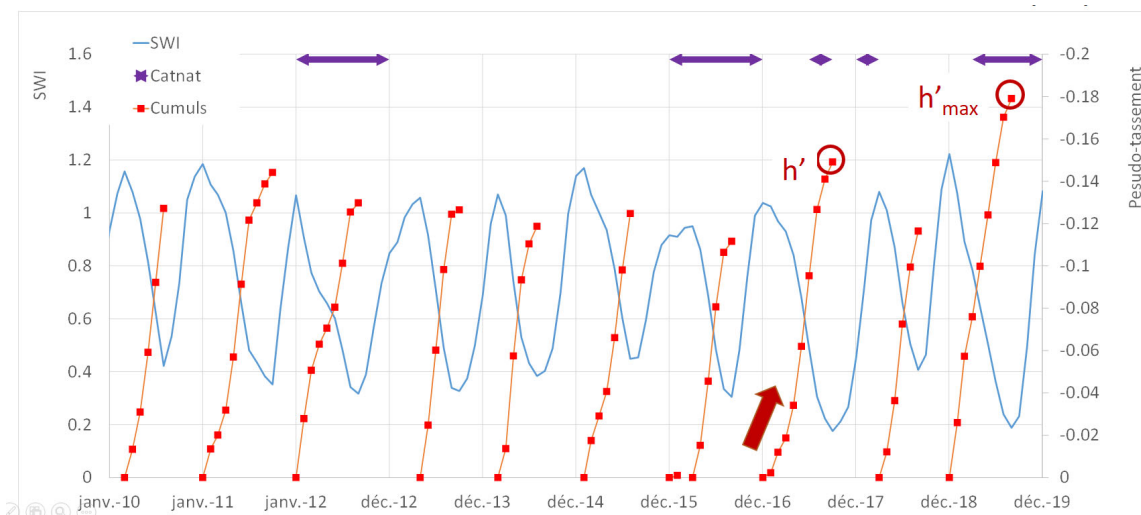


Figure 33 – Calcul des pseudo-tassements (exemple commune de Calvisson, Gard)

En l'état, il n'est pas possible de juger de l'acceptabilité des tassements calculés pour les structures puisque de fait des pseudo-tassements sont évalués. La corrélation pseudo-tassement / tassement réel est à rechercher dans les relations entre $dSWI$ et dw d'une part et $RL_{in-situ}$ et RL_{labo} d'autre part.

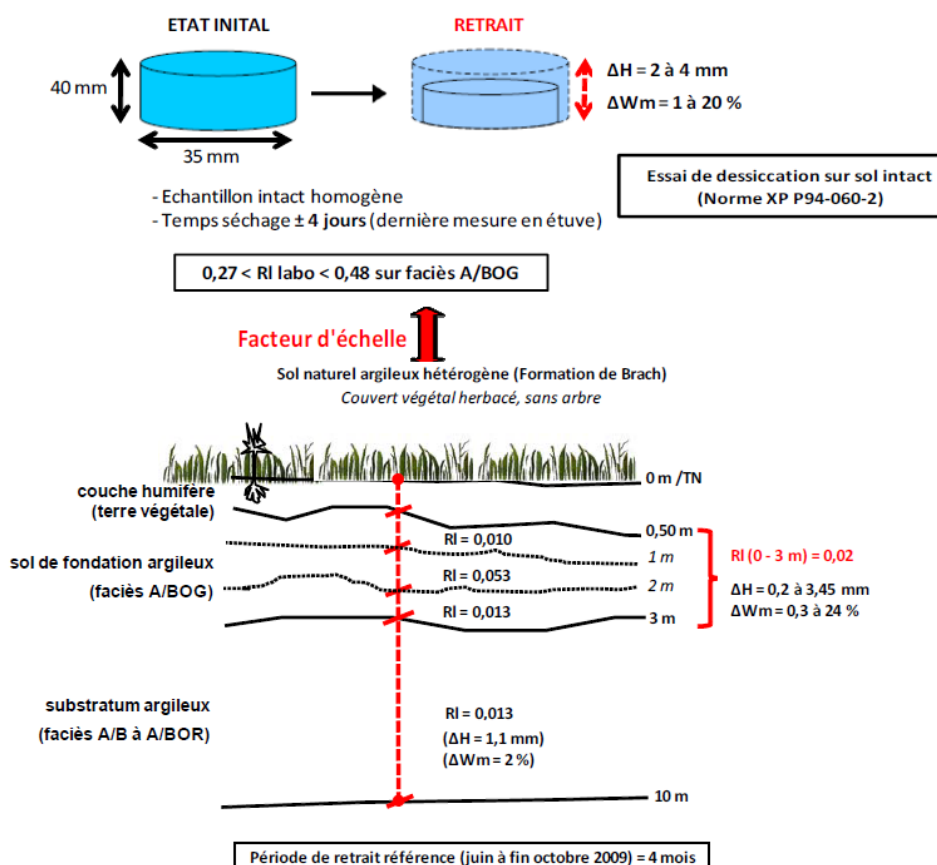


Figure 34 – Analyse comparative entre valeur de RL en laboratoire et les valeurs RL déduite de mesures in situ (Chrétien, 2010)

4.3.2. Cartographie dynamique de l'aléa RGA et définition de seuils (D4)

a) Processus

Sur la base des travaux précédents, le processus proposé est le suivant :

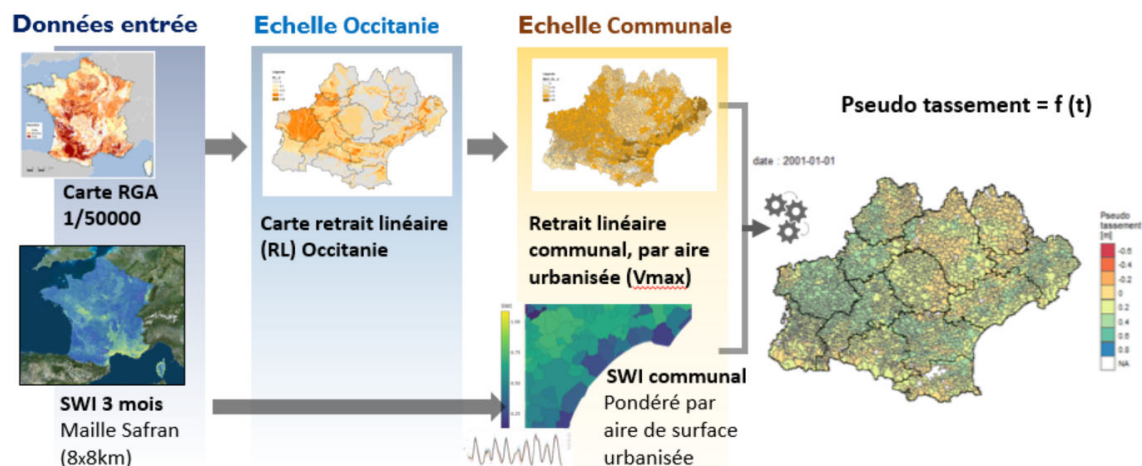


Figure 35 – Processus de calcul : pseudo-tassement en fonction du temps

En fonction des valeurs calculées sur l'ensemble de la période 1969-2019 (50 ans), il est proposé des seuils à l'échelle régionale. Les seuils correspondent aux dépassements de valeurs de pseudo-tassement sur la période en analogie avec les critères Cat Nat :

- Une période de retour de 25 ans correspond à des dépassements survenant deux fois sur la période d'observation ce qui correspond au quantile de 4% (Q4). Ce quantile qualifie la survenance du phénomène avec période de retour « exceptionnelle » ;
- Les propositions de seuils intermédiaires sont basées sur l'admissibilité présumée des tassements à partir de Q4 : Q4/2 et Q4/4 :



Figure 36 – Proposition de seuils en fonction de la distribution des pseudo-tassements à l'échelle régionale

On note que à Q4/2 on a plus de 50% de dépassement, mais probablement beaucoup moins de maisons vulnérables sur ce seuil et par conséquent moins de sinistres en zone « orange » qu'en zone « rouge ». Ce constat est intuitif et serait intéressant à chiffrer dans le cadre d'analyse de la fragilité du bâti courant.

La mise en application pour une année complète (2003) à l'échelle régionale est reportée sur la carte de la Figure 37 :

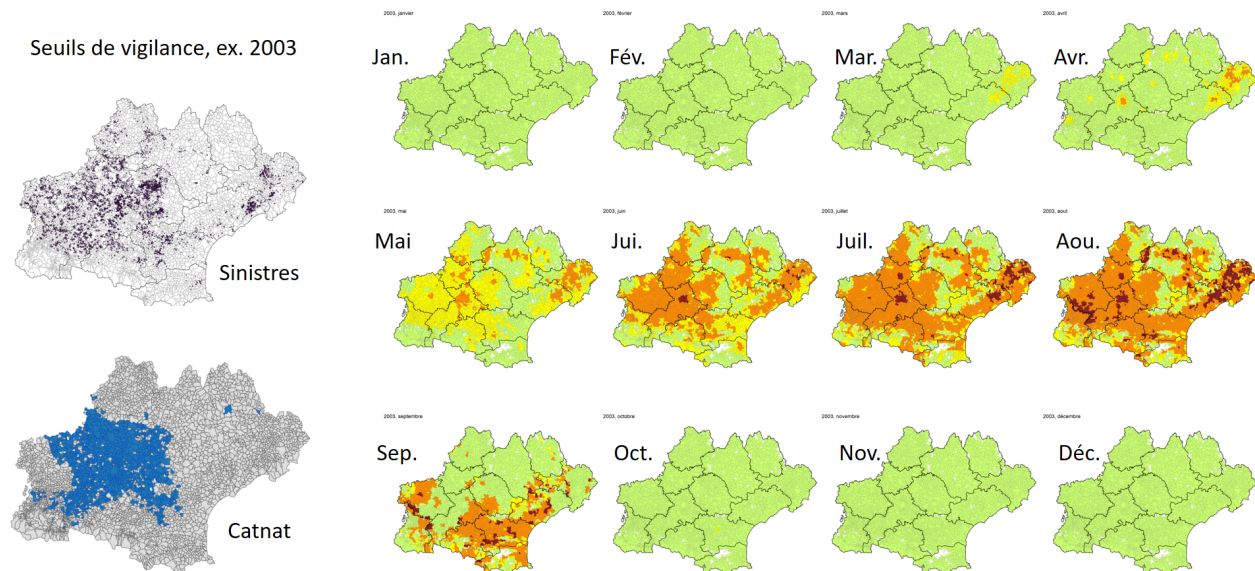


Figure 37 – Analyse spatio-temporelle de l'aléa RGA (année 2003) à partir des algorithmes produits dans le cadre du projet VISEGEO

Cette figure est très intéressante car la comparaison des communes reconnues Cat Nat, de la sinistralité et des cartes produites montre : i) une bonne adéquation des zones couvertes et ; ii) une représentativité plus fiable que la reconnaissance réalisée (à ce titre des procédures exceptionnelles avaient été dégagées en 2003 dans le Gard par exemple pour mieux coller à la réalisées des observations). Au-delà elle montre également de façon assez claire l'évolution spatiale et temporelle de la sévérité du phénomène RGA sur l'ensemble de la région.

b) Validation

La validation des travaux à partir des arrêtés Cat Nat n'est pas pertinente tant au niveau des périodes que des durées associées. Une des idées a été de valider la cartographie avec la collecte de sinistres datés. Cependant, deux obstacles à cette approche ont été mis en évidence : i) difficulté d'accès à cette donnée pendant la durée du projet et ; ii) représentativité non évaluée de ce type de donnée. En effet, des sinistres déclarés une année sont très souvent liés à une sécheresse passée pour laquelle aucune déclaration n'a été faite.

La piste de travail la plus aboutie correspond à la valorisation de données d'interférométrie satellitaires (INSAR). En effet cette technique permet de quantifier les faibles déplacements verticaux avec une fréquence de mesure régulière (tous les six jours avec le réseau SENTINEL par exemple). Cette voie a déjà été testée par divers opérateurs (Enguehard et al. 2019, Burnol et al. 2021, Figure 38).

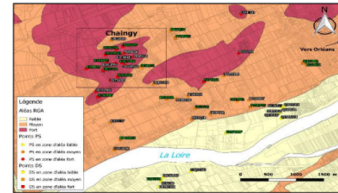
INSAR SENTINEL 1

RGA sur Chaingy (45)

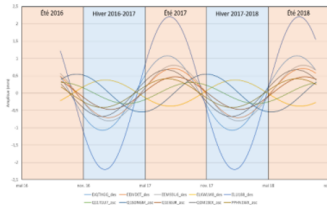
Enguehard et al., 2019 (BRGM/Altamira TRE)



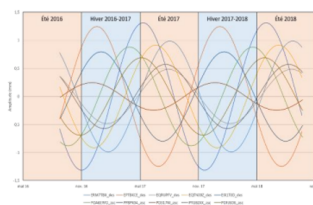
Ext 1 and 2 extensometer location map and SqueeSAR® PS 1 and 2 vertical points in the city of Chaingy



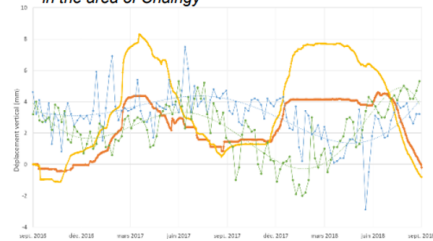
Clay Swelling Hazard map and location of PS and DS analyzed in the area of Chaingy



Annual cyclical movements for 10 PS in low Shrinking-Swelling hazard area



Annual cyclical movements for 10 PS in strong Shrinking-Swelling hazard area



Comparison between extensometers and vertical displacement data of SqueeSAR® points at Chaingy from September 2016 to August 2018

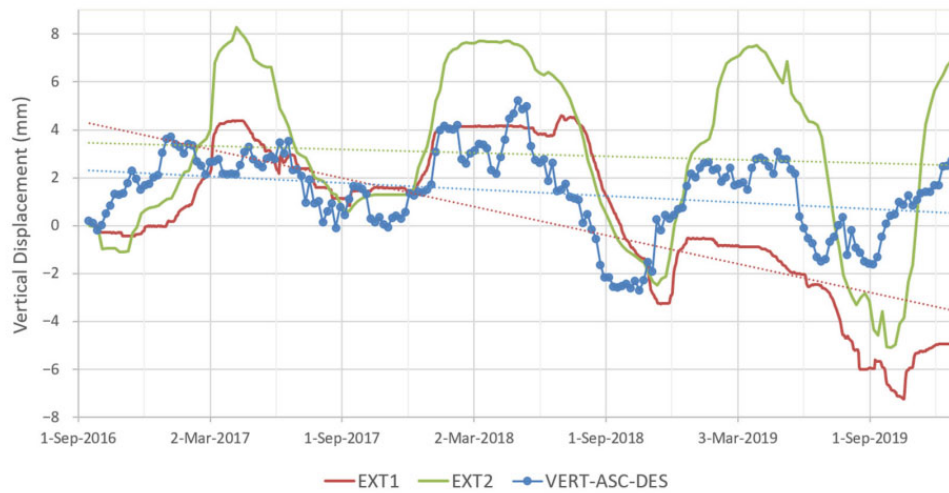


Figure 38 – Comparaison de mesures de déplacement vertical in situ (extensomètre EXT1 and EXT2) et du déplacement vertical mesuré par INSAR (trace ascendante et descendante Sentinel-1)
(Enguehard et al. 2019 en haut, Burnol et al. 2021 en bas)

Dans le cadre du projet VISEGEO, avec ces données SENTINEL (2015-2018) on relève par secteur une bonne corrélation entre déplacement de sol INSAR et indice SWI à trois mois, ce qui renforce notre approche. La difficulté de valorisation repose sur une généralisation de cette tendance qui est liée à la nature du réflecteur et au filtrage de la masse de données disponibles.

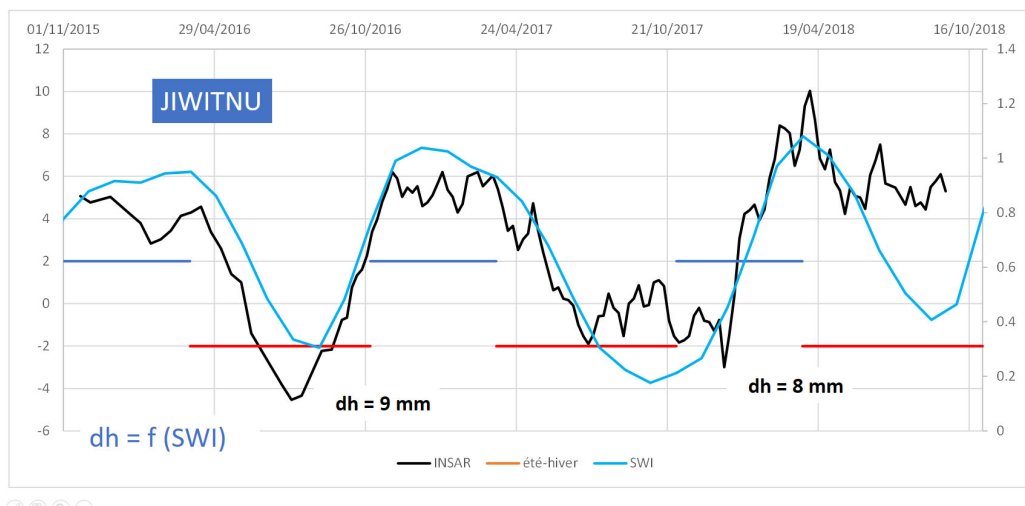


Figure 39 – Traitement donnée INSAR et comparaison avec variation du SWI (réflecteur JIWITNU sur Calvisson, Gard)

Le développement récent de l'EGMS³ à l'échelle européenne incite à continuer la recherche dans la valorisation de la donnée INSAR. En effet, des signaux très clairs caractéristiques de phénomènes RGA sont visibles sur les chroniques disponibles en ligne entre 2016 et 2021 (Figure 40).

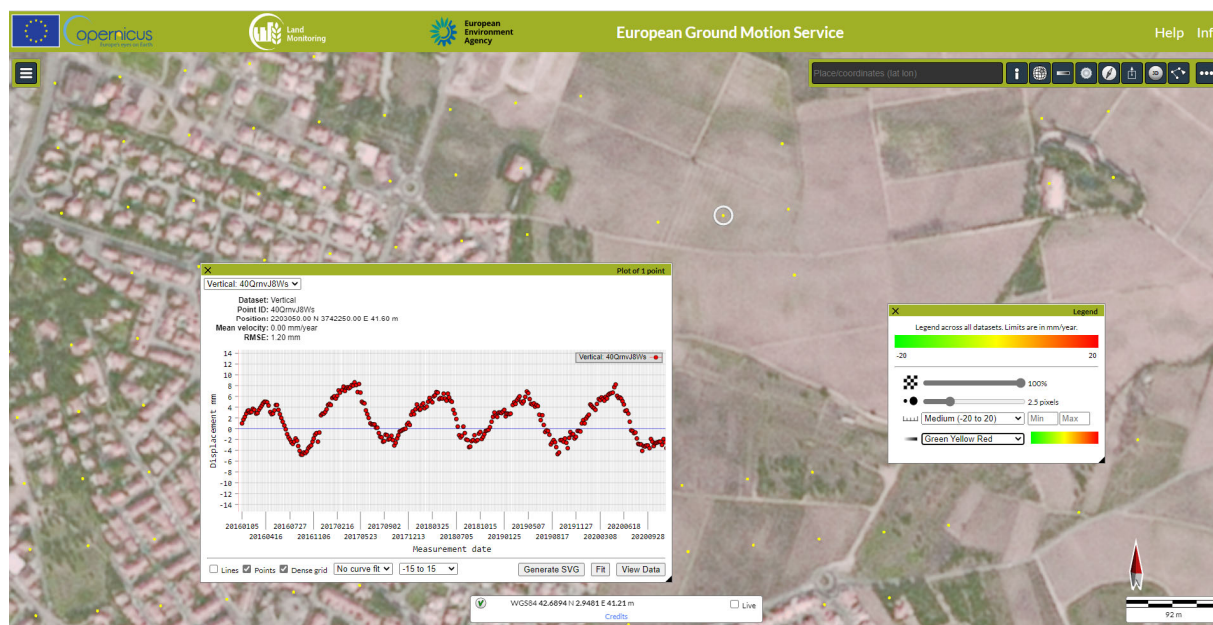


Figure 40 – Exemple de chronique récente EGMS caractéristique de phénomène RGA (gonflement en fin de période hivernale et tassement jusqu'à l'automne et amplitude annuelle variable)

³ European Ground Motion Service (<https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>). L'EGMS fournit des informations cohérentes et fiables sur les mouvements du sol naturels et anthropiques au-dessus des États participants à Copernicus et au-delà des frontières nationales, avec une précision millimétrique. L'EGMS représente une référence pour les applications du mouvement du sol aux niveaux continental, national et local.

c) Perspectives

Les premiers résultats produits sont très prometteurs pour la prévention en fonction de la dynamique de sécheresse géotechnique estimée. Ceci étant des enrichissements / adaptations peuvent être attendues dans le futur :

- Adaptations localisées (en zone montagne notamment en intégrant les données de température ou plus basiquement d'altitude) ;
- Amélioration de la carte de RL en intégrant de façon plus objective la lithologie des terrains dans la mesure du possible (même si des tests ont déjà été réalisés) ;
- Meilleure évaluation des données SWI locales à partir de la donnée sources du SWI quotidien (donnée non accessible auprès de Météo-France dans le cadre du projet) ;
- Prise en compte de cycles de sécheresse successifs pour rendre compte de l'effet cumulatif de crises météorologiques (Figure 41). Cette séquence instrumentée montre la complexité de la prise en compte de la sévérité d'un phénomène de sécheresse géotechnique. En faisant abstraction des vulnérabilités du bâti (âge de construction et mode de fondation notamment) l'intégration de ces tassements « maximaux » à l'échelle d'une parcelle pourraient constituer une piste de développement certaine ;
- Adaptation des seuils au regard de mesures réalisées (absolues : dispositif VISEGEO, données INSAR, ou relatives grâce à l'accès à de la donnée datée de sinistre – donnée d'accès refusée par CCR ou MRN dans le cadre du projet) ;
- Mise à l'épreuve du démonstrateur sur une période de test (été 2022 et saison 2022-2023).

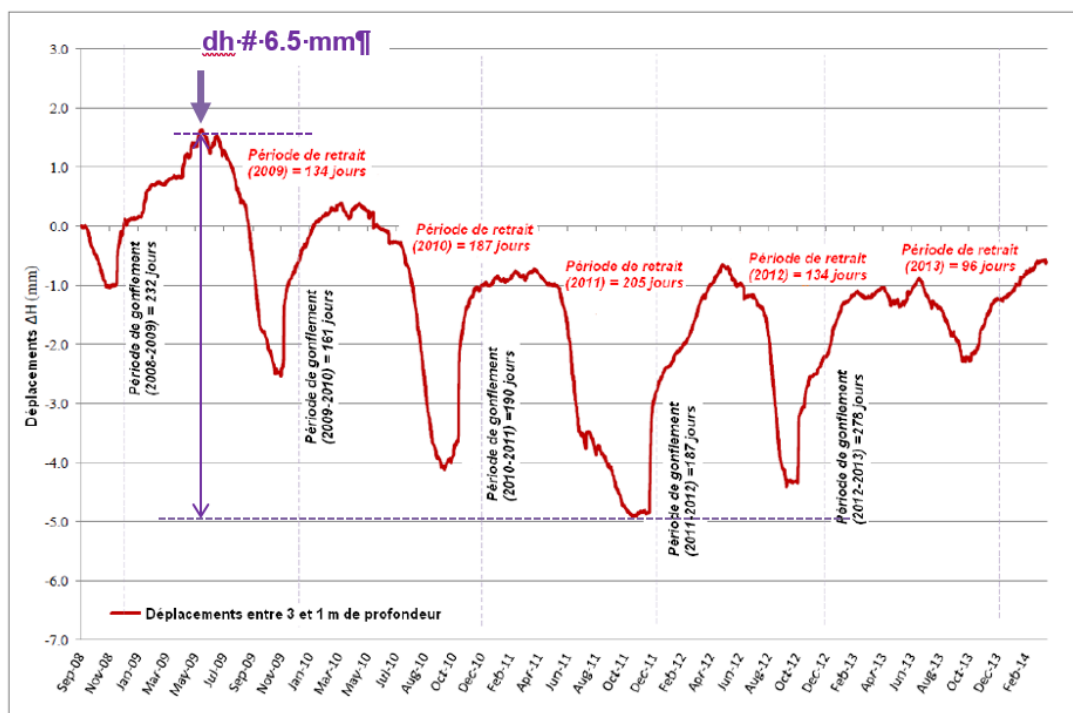
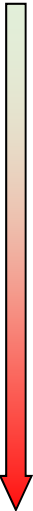


Figure 41 – Effet cumulatif des déformations en amplitude suite à des sécheresses cumulées (déformations sur 2 m d'épaisseur du sol argileux entre 2008 et 2014, adapté de Chrétien, 2010)

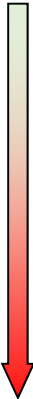
5. Catalogue de dispositions opérationnelles de réduction des aléas et/ou des vulnérabilités des infrastructures exposées (D5)

Le catalogue de mesures est basé sur l'état de l'art (D1) et les REX du BRGM et de GEOSEC en la matière. Il s'agit de consignes d'actions / recommandations possibles à engager avec le souci de consignes : i) innovantes ; ii) graduées dans le temps en fonction de la sévérité du phénomène ; iii) adaptées aux cibles. *In fine* un fascicule « VISEGEO » est à créer :

A destination des particuliers :

- 
- Se renseigner sur l'exposition de sa maison aux risques de RGA
 - Suivre les recommandations lors de la construction ou de l'agrandissement de son habitation
 - Enherber de façon uniforme le pourtour de sa maison
 - Imperméabiliser la périphérie de l'habitation pour limiter l'évaporation
 - Collecter les eaux pluviales pour garantir un arrosage optimal en période de restriction
 - Etudier la faisabilité d'injecter des résines expansives
 - Se tenir informer et rester attentif à l'évolution de la sécheresse
 - Arroser le soir le pourtour de sa maison de manière uniforme en réutilisant les eaux de collectes
 - Travailler le sol en surface pour favoriser l'infiltration d'eau avec des outils adaptés (griffe de jardin, râteau, pelle)
 - Elaguer les arbres proches de votre habitation pour limiter leur besoin en eau
 - Si vous constatez l'apparition d'une fissure importante, contacter votre assureur pour envisager l'intervention de professionnels (injection de résine)

A destination des municipalités :

- 
- Se renseigner sur l'exposition du territoire communal aux risques de retrait et gonflement des argiles
 - Entretenir les réseaux et réparer les fuites d'eau
 - Collecter les eaux pluviales pour garantir un arrosage optimal en période de restriction
 - Se tenir informer et rester attentif à l'évolution de la sécheresse
 - Informer la population via les vecteurs de communication de la commune (internet, réseaux sociaux, affichage panneau lumineux)
 - Utiliser les eaux collectées pour un arrosage uniforme autour des bâtiments communaux sensibles
 - Garantir l'élagage des arbres proche des habitations individuelles et des bâtiments communaux sensibles
 - Renforcer l'information auprès des habitations sensibles (cf. carte retrait linéaire)
 - Si vous constatez l'apparition d'une fissure importante dans un bâtiment communal, contacter votre assureur pour envisager l'intervention de professionnels (injection de résine)
 - Accompagner les sinistrés dans la constitution de leur dossier.

6. Démonstrateur VISEGEO : mise en œuvre d'une maquette, pilote de la solution intégrée (D6)

La solution intégrée VISEGEO est axée sur le principe des niveaux de sécurité PREDICT pour les inondations. La solution renvoie des niveaux d'actions (information / organisation / protection) selon des niveaux de sécurité gradués (vigilance / mobilisation / sécurité ; Figure 42) :

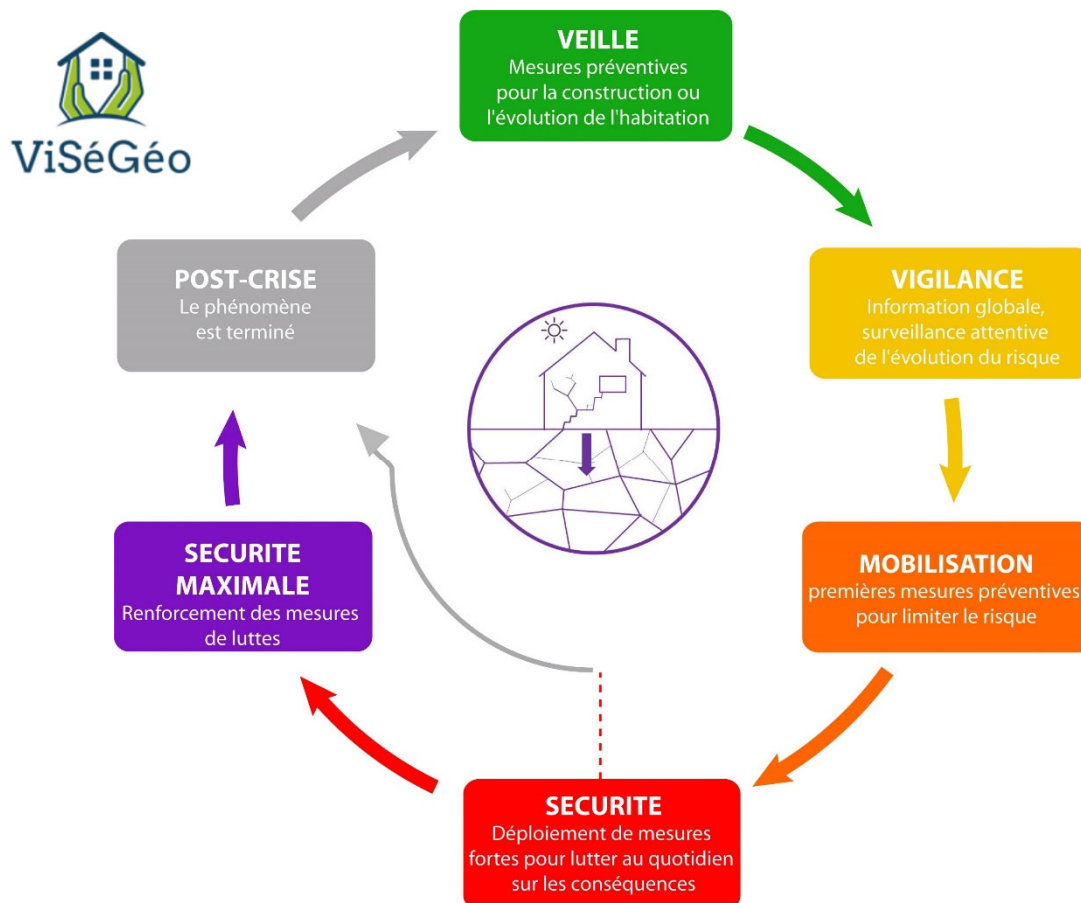


Figure 42 – Principes de gestion du risque selon seuils de vigilance définis dans VISEGEO

Le démonstrateur VISEGEO s'appuie sur les développements déterminant les niveaux de seuils (D2, D4, § 4.3) pour la préconisation de recommandations (D5, § 5). A ce jour la maquette est réalisée comme un démonstrateur et est un système pré-opérationnel au sens de TRL 4 à 6.

L'objectif est d'aboutir à un démonstrateur au sens du TRL 7 en fin de projet avec installation de poste dédié au sein de la Vigie Predict avec mise en test de l'ensemble de la chaîne de traitement jusqu'à la transmission d'informations aux utilisateurs finaux ciblés (Figure 44).

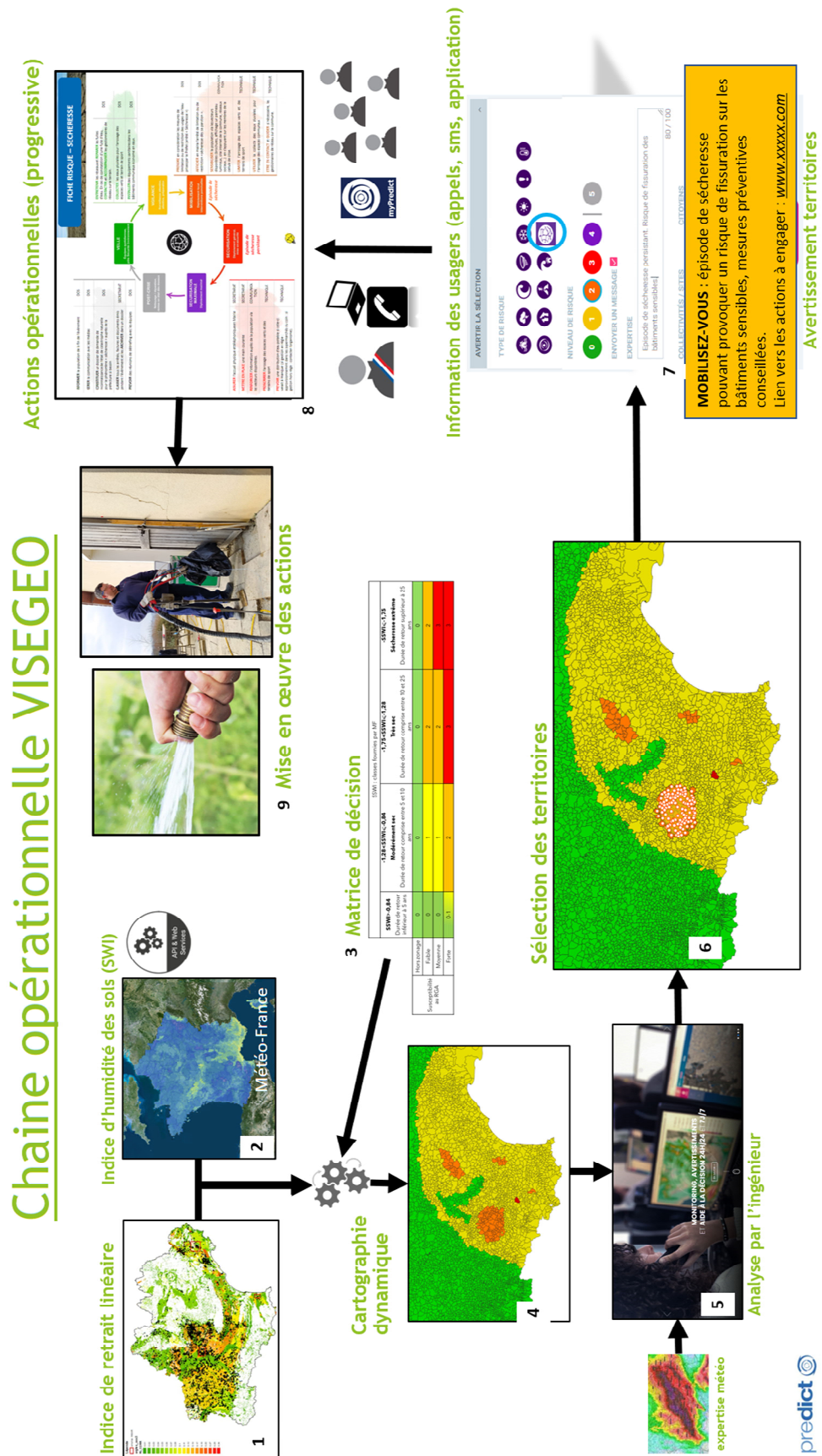


Figure 43 – Chaîne organisationnelle VISEGEO

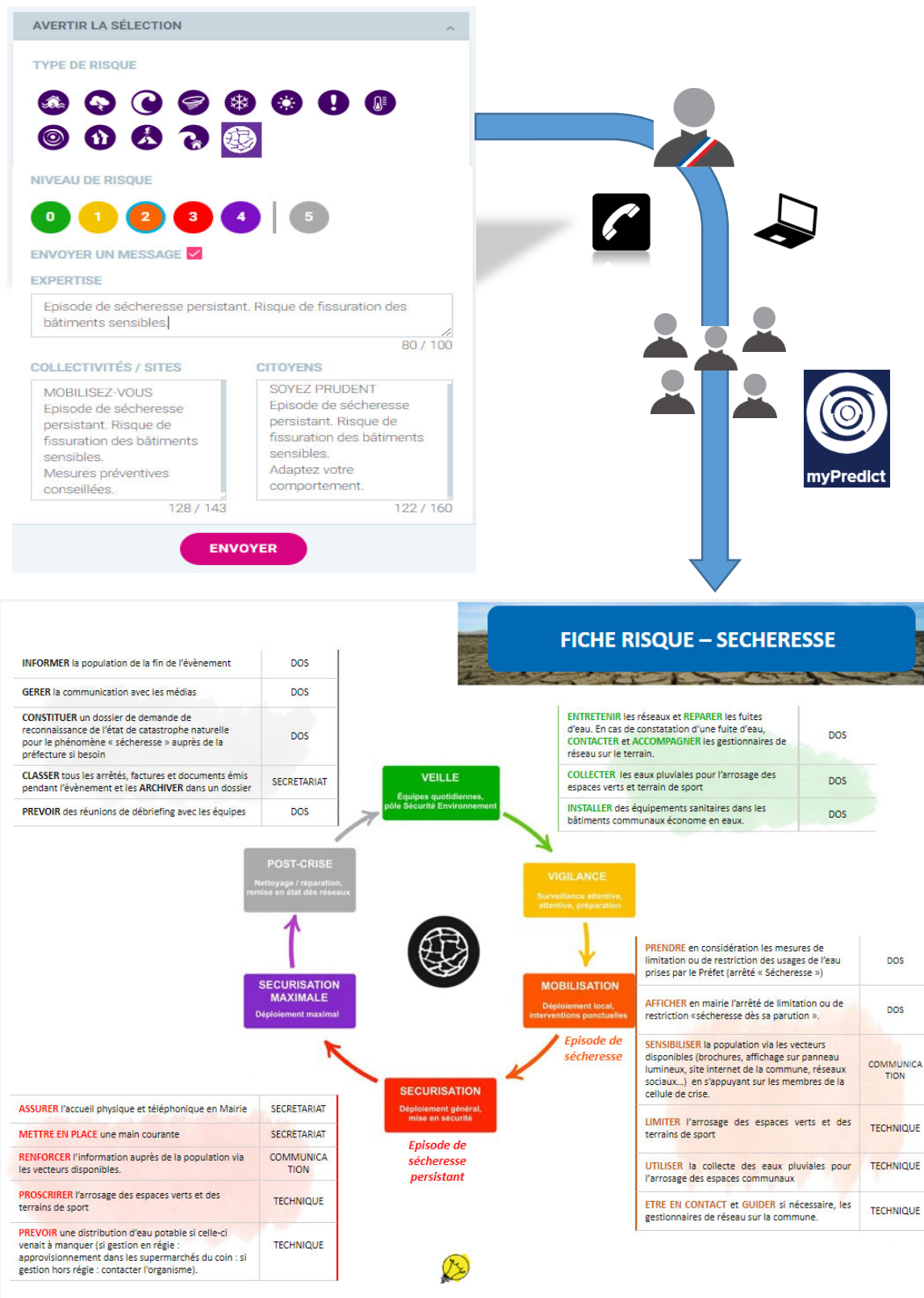


Figure 44 – Transmission d'information VISEGEO

7. Actions de communication

Les actions de publicité concernent avant tout la réalisation d'un film sur le projet (<https://veille-eau.com/videos/visegeo-la-solution-integree-vigilance-secheresse-geotechnique>) :

<https://veille-eau.com/videos/visegeo-la-solution-integree-vigilance-secheresse-geotechnique>

Le projet ViSéGéo, dont le BRGM est partenaire, vise à mettre en place gestion intégrée du risque de sécheresse en essayant notamment de bâtir un système prédictif du phénomène de retrait gonflement des argiles.

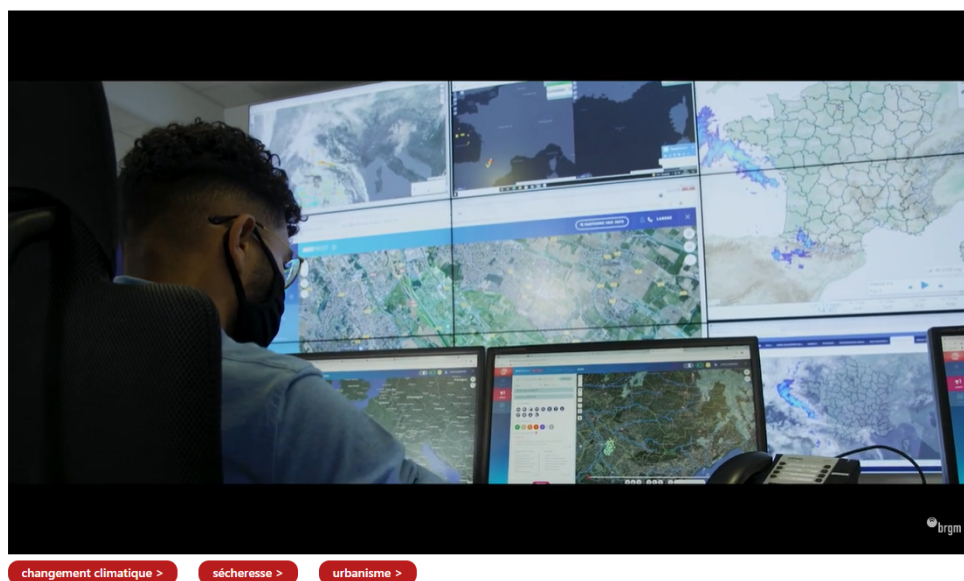


Figure 45 – Capture d'écran film VISEGEO

Les principales actions de communication ont été planifiées en 2022 en raison de l'avancement des réalisations et notamment :

- article dans la revue "Techniques de l'Ingénieur" (<https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/un-systeme-predictif-pour-limiter-le-risque-de-retrait-gonflement-des-sols-argileux-113816/>);
- article Midi-Libre (<https://www.midilibre.fr/2022/06/01/habitations-fissurees-a-cause-de-la-secheresse-le-phenomene-setend-quels-recours-pour-les-victimes-10331353.php>).

8. Conclusion

Le présent document dresse une synthèse des travaux réalisés par le BRGM dans le cadre du projet VISEGEO. Le projet VISEGEO, porté par le consortium BRGM, PREDICT et GEOSEC, est soutenu par la Région Occitanie et l'Europe (FEDER), dans le cadre de l'appel à projet READY'NOV, et le Ministère de l'Écologie. Il vise à définir une amélioration de la prévention du risque retrait-gonflement des sols argileux (RGA) dont les impacts sont financièrement très élevés au niveau national (2^{ème} poste d'indemnisation Cat Nat après les inondations).

Le projet s'est structuré suivant 8 lots :

- Lot 0 : Coordination, management projet
- Lot 1 : État de l'art sur le phénomène de retrait gonflement des sols argileux
- Lot 2 : Etude paramétrique multi facteurs
- Lot 3 : Instrumentation sites pilotes (Haute-Garonne)
- Lot 4 : Cartographie dynamique
- Lot 5 : Dispositifs opérationnels de gestion
- Lot 6 : Pilote solution intégrée avec tests qualitatifs
- Lot 7 : Finalisation, optimisation solution VISEGEO et premier déploiement
- Lot 8 : Valorisation résultats, communication

Les contenus scientifiques et techniques du projet ont permis de développer de :

- Schémas de caractérisation spatio-temporelle de la sévérité de phénomènes de RGA ;
- Modes de transferts d'information vers les utilisateurs finaux du service ;
- Préconisations opérationnelles pour limiter / réduire les impacts du phénomène.

La solution intégrée VISEGEO est axée sur le principe des niveaux de sécurité PREDICT pour les inondations. La solution renvoie des niveaux d'actions (information / organisation / protection) selon des niveaux de sécurité gradués (vigilance / mobilisation / sécurité).

En fin de projet le démonstrateur VISEGEO s'appuie sur les développements déterminant les niveaux de seuils pour la préconisation de recommandations. Le système développé est un système pré-opérationnel au sens de TRL 4 à 6. En fin de projet, l'objectif est d'aboutir à un démonstrateur au sens du TRL 7 avec installation de poste dédié au sein de la Vigie PREDICT et mise en test de l'ensemble de la chaîne de traitement jusqu'à la transmission d'informations aux utilisateurs finaux ciblés.

9. Bibliographie

- Bauer-Marschallinger, B., Freeman, V., Cao, S., Paulik, C., Schaufler, S., Stachl, T., Modanesi, S., Massari, C., Ciabatta, L., Brocca, L., Wagner, W. (2019). Toward Global Soil Moisture Monitoring With Sentinel-1: Harnessing Assets and Overcoming Obstacles. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. doi 10.1109/TGRS.2018.2858004
- BRGM (2019). "Géosciences et risques naturels", the BRGM review for sustainable land No: 23, pp 50-57.
- BRGM (2009). Projet ARGIC (Analyse du Retrait-Gonflement et de ses incidences sur les Constructions). Projet ANR-05-PRGCY-005. Rapport de synthèse final. BRGM/RP-57011-FR.
- BRGM (2022). Sécheresse géotechnique des sols : analyse des déclencheurs climatiques et solutions de gestion du risque. Etat de l'art. Projet VISEGEO. 71 p. 54 illustrations. Rapport BRGM/RP-71773-FR.
- BRGM (2020). Méthodologie de cartographie du régo-lithe à partir de données radiométriques aéroportées en région Centre : Etablissement de cartes lithologiques. Rapport final. BRGM/RP-64932-FR
- BRGM (2015). Cartographie des argiles gonflantes à grande échelle à partir de bases de données géotechniques, des mesures de spectroscopie infrarouge terrain et d'imagerie spectrale. AGEOTHYP. Rapport final. Rapport BRGM/RP-63768-FR
- Burnol A., Fomelis M., Gourdiér S. (2021). Monitoring of Expansive Clays over Drought-Rewetting Cycles Using Satellite Remote Sensing. Atmosphere. doi: 10.3390/atmos12101262
- CCR (2018). "Impact du changement climatique sur les dommages assurés", Scenario RPC 8.5, Report of a study available online: www.catastrophes-naturelles.ccr.fr.
- Champeaux J-L., Masson V. & Chauvin F. (2003). ECOCLIMAP: a global database of land surface parameters at 1 km resolution. Metéo-France/CNRM. Meteorol. Appl. 12, 29–32 (2005) doi:10.1017/S1350482705001519
- Chrétien M. (2010). Thèse de doctorat. Compréhension des mécanismes de retrait-gonflement des sols argileux : approche sur site expérimental et analyse de sinistres sur constructions individuelles. <http://www.theses.fr/2010BOR14033>
- Cour des Comptes. Sols argileux et catastrophes naturelles (2022). Des dommages en forte progression, un régime de prévention et d'indemnisation inadapté. Communication au Comité d'évaluation et de contrôle des politiques publiques de l'Assemblée nationale.
- Ducasse, E. et al. (2016). Discrimination d'argiles à partir de mesures hyperspectrales de laboratoire. 4ème colloque scientifique du groupe thématique hyperspectral de la SFPT (SFPT-GH), May 2016, Grenoble, France (<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01300634v1>)
- Fabre R., Denis A., Lataste J-F. Fernandes M. (2015). Analyse in-situ des cycles de retrait-gonflement d'un sol argileux.
- GEOSEC (2020). Les cahiers de consolidation des sols par injection de résines expansives (GEOSEC). Numéro 6
- Gourdiér S., Grandjean G. (2014). Modèle de réponse des sols argileux à la sécheresse : application au site instrumenté de Mormoiron. JNGG (2014)
- Gourdiér S. Plat E. (2018). Impact du changement climatique sur la sinistralité liée au retrait-gonflement des argiles. JNGG (2018)

- IFSTTAR, ARMINES (2017). Guide technique. Retrait et gonflement des argiles - Caractériser un site pour la construction, guide 1. ISBN 978-2-85782-729-0
- IFSTTAR, INERIS (2017). Guide technique. Retrait et gonflement des argiles - Analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse, guide 3. ISBN 9 78-2-85782-731-3
- Laguardia G., Niemeyer S. On the comparison between the LISFLOOD modelled and the ERS/SCAT derived soil moisture estimates. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union, 2008, 5 (3), pp.1227-1265. fhal-00298951
- Mathon D., Dore L., Ighil Ameur L. (2018). "Réparer une maison en arrosant ses fondations – Le projet MACH". JNGG, 13-15 June 2018, Champs-sur-Marne, France.
- Mouroux P., Margon P., Pinte J.C. (1988). La construction économique sur les sols gonflants : Manuels et méthodes, vol. 14, BRGM
- Météo-France. Direction de la Climatologie et des Services Climatiques (2021). Rapport météorologique. Contribution de Météo-France à l'analyse de la sécheresse géotechnique à l'attention de la Commission CatNat pour l'année 2020
- Najac J., N. Kitova, Jean-Philippe Vidal, Jean-Michel Soubeyroux, E. Martin (2010). Caractérisation des sécheresses en France au cours du XXI^e siècle. XXIII^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Risques et changement climatique, Rennes, France. p. 433 - p. 438. hal00536859
- Projet ARGIC. Recommandations pour le choix de critères d'identification de périodes de sécheresse exceptionnelles. Rapport de synthèse de la tâche 27 du module C (2009)
- Soubeyroux, J.-M., Vidal, J.-P., Baillon, M., Blanchard, M., Céron, J.-P., Franchistéguy, L., Régimbeau, F., Martin, E. & Vincendon, J.-C. (2010) Caractérisation et prévision des sécheresses et étiages en France à partir de la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou. La Houille Blanche, (5), 30-39. DOI : 10.1051/lhb/2010051
- Soubeyroux, J.-M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J.-P., Martin, E. & Dandin, P. (2012) Sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet ClimSec. La Météorologie, 78, 21-30. DOI : 10.4267/2042/47512
- Soubeyroux J.-M., J.-P. Vidal, J. Najac, N. Kitova, M. Blanchard, P Dandin, E. Martin, C. Pagé, F. Habets (2011). Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol Rapport final du projet. Réalisé par la Direction de la Climatologie de Météo-France. En partenariat avec : CNRS GAME : Centre National de Recherches Météorologiques, CERFACS, UMR SISYPHE (Mines Paris Tech), CEMAGREF. Avec le soutien de la FONDATION MAIF.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Baillon, M., Franchistéguy, L. et Soubeyroux, J.-M. (2010), A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. International Journal of Climatology, 30(11), 1627–1644. DOI : 10.1002/joc.2003
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M. et Baillon, M. (2010), Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. Hydrology and Earth System Sciences, 14(3), 459-478. DOI : 10.5194/hess-14-459-2010
- Vidal, J.-P., Martin, E., Kitova, N., Najac, J. & Soubeyroux, J.-M. (2012) Evolution of spatio-temporal drought characteristics : validation, projections and effect of adaptation scenarios. Hydrology and Earth System Sciences, 16(8), 2935-2955. DOI : 10.5194/hess-16-2935-2012



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Occitanie

1039 Rue de Pinville

34000 – Montpellier – France

Tél. : 04 67 15 79 80

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm