

Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France pour le risque de sécheresse géotechnique (retrait-gonflement des sols argileux)

Rapport final du Groupe de Travail Risques Naturels,
Assurances et Changement Climatique

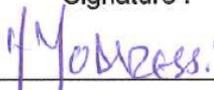
BRGM/RP-56771-FR

mai 2009

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM 08LITZ02

E. Plat, M. Vincent et N. Lenôtre (BRGM), C. Peinturier (MEEDDAT/CGDD/SEEIDD),
B. Poupat et P. Dorelon (MEEDDAT / CGDD / SOeS), P. Chassagneux (Météo
France), J.B. Kazmierczak (INERIS), J. L. Salagnac (CSTB), S. Gerin, R. Nussbaum
et J. Chemitte (MRN)

Vérificateur :
Nom : Winter T.
Date : 06/05/09
Signature : 

Approbateur :
Nom : Modaressi H.
Date : 18/05/2009
Signature : 

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Changement climatique, risques naturels, retrait-gonflement, argiles, coût, adaptation

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

Plat E., Vincent M. et Lenôtre N. (BRGM), Peinturier C., Poupat B. et Dorelon P. (MEEDDAT/CGDD), Chassagneux P. (Météo France), Kazmierczak J.B. (INERIS), Salagnac J.L. (CSTB), Gerin S., Nussbaum R. et Chemitte J. (MRN) (2009) - Estimation des coûts du changement climatique liés à l'aléa retrait-gonflement – Rapport final du Groupe de Travail Risques Naturels, Assurances et Changement Climatique. BRGM/RP-56771-FR, 62 p., 28 ill.

Synthèse

Il est actuellement admis que la France va continuer à subir les effets du changement climatique global, accompagné de sécheresses estivales plus fréquentes, plus longues et plus intenses. En application du Plan Climat français (2006), un groupe de travail interministériel a été constitué en mars 2007 pour une durée de 2 ans sur le thème « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France », afin de procéder à une première évaluation des dommages attendus du fait du changement climatique et d'identifier des mesures permettant d'en limiter les impacts.

Le présent document est le rapport de synthèse issue de l'expertise collective de la subdivision « retrait-gonflement des sols argileux » du groupe de travail « Risques naturels, assurances et mesures d'adaptation au changement climatique » constitué du BRGM, du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), du Commissariat général au développement durable (CGDD) - sous-directions Service de l'observation et des statistiques (SOeS) et Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable (SEEIDD) - et de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère en charge de l'environnement (MEEDDAT), de Météo-France et de la Mission risques naturels (MRN) sous la coordination du BRGM. L'étude réalisée par ce sous-groupe a consisté à établir, sur la base des connaissances disponibles, une méthodologie pour l'étude de l'impact du changement climatique sur le retrait-gonflement aux horizons 2030, 2050 et 2100.

Après observation de la sinistralité connue en France entre 1989 et 2003, deux types d'évènement ont été définis : un évènement de type « bruit de fond » représentant l'ensemble des années hors 2003 et un évènement de type « 2003 », caractérisé par une sinistralité environ six fois plus importante que pour une année de type « bruit de fond ». L'hypothèse retenue pour évaluer l'influence du changement climatique sur le phénomène a consisté à prendre en compte l'évolution des fréquences d'occurrence des épisodes de « sécheresse géotechnique ». Celle-ci a été déterminée en collaboration entre Météo-France et la DGEC à partir d'une simulation en température d'Arpège sur les scénarios A2 et B2. L'extension géographique du phénomène telle que délimitée par les cartes d'aléa retrait-gonflement a été supposée ne pas évoluer avec le changement climatique attendu et aucune modification de l'intensité du phénomène (qui se traduirait par une aggravation de la sinistralité) n'a donc été prise en compte entre 2010 et 2100.

Deux évaluations complémentaires de l'impact du changement climatique ont été menées : l'une à l'échelle nationale calquée sur la méthode mise en oeuvre dans l'annexe technique du rapport « Financial Risk of Climate Change » commandé par l'Association des Assureurs Britanniques (ABI) et, l'autre, à l'échelle départementale qui s'appuie sur des données supplémentaires que sont les cartes d'aléa retrait-gonflement à l'échelle départementale et les coûts d'indemnisation par département fournis par la Caisse centrale de réassurance (CCR).

L'application de la méthode à l'échelle nationale a permis de montrer, d'une part, que même en l'absence de changement climatique les coûts engendrés par le phénomène ne seraient pas négligeables, et, d'autre part, que le changement climatique devrait entraîner une augmentation des coûts moyens annuels des dommages imputables au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux variables selon l'hypothèse de changement climatique retenue : de 20 à 220 % à l'horizon 2030, de 45 à 330 % à l'horizon 2050 et être multipliés par 3 à 6 fois d'ici la fin du siècle. La prise en compte de l'évolution du nombre de maisons individuelles du fait des nouvelles constructions a paru nécessaire dans une telle étude, d'autant plus que d'éventuelles mesures d'adaptation peuvent être prises pour ce type de constructions.

La méthode appliquée à l'échelle départementale permet, quant à elle, la prise en compte différenciée de l'évolution du nombre de maisons individuelles par département en fonction des évolutions démographiques extrapolées au vu des dernières années. Elle a nécessité la réalisation par le BRGM de cartes d'aléa retrait-gonflement selon une méthodologie simplifiée dans les départements où cette carte n'a pas encore été réalisée dans le cadre de la cartographie nationale (www.argiles.fr). Le croisement des cartes d'aléa avec les données de sinistres et la répartition des maisons individuelles a conduit à calculer, pour les différents secteurs, la proportion de maisons individuelles sinistrées pour les deux types d'évènement définis. Malgré les limites et incertitudes inhérentes à la méthode mise en œuvre, il apparaît d'une part que le changement climatique pourrait induire une augmentation des coûts cumulés sur la période 2010-2030 significative : entre 36 et 98 % avec le scénario A2 et entre 36 et 66 % dans le cas du scénario B2 par rapport au cas sans changement climatique et à enjeux constants et, d'autre part, que le taux d'évolution du nombre de maisons individuelles (du fait des nouvelles constructions) joue un rôle dans les coûts attendus à l'horizon 2030.

Une fois les coûts relatifs au retrait-gonflement évalués, plusieurs méthodes d'adaptation ont été envisagées pour les futurs projets de construction, à savoir l'adaptation des fondations et la mise en œuvre des mesures préconisées par les Plans de prévention des risques naturels (PPRN). Il est apparu d'une part la nécessité de mettre en œuvre des mesures d'adaptation de manière différenciée selon les zones d'aléa des départements sur la base des proportions de maisons individuelles sinistrées et, d'autre part, la nécessité de poursuivre les efforts de recherche pour quantifier les rapports coûts/efficacité des mesures de réparations et des mesures d'adaptation des constructions.

Sommaire

1. Introduction et rappels des objectifs	9
1.1. CADRE	9
1.2. PROBLEMATIQUE DU RETRAIT-GONFLEMENT	9
1.3. CONTRIBUTEURS	10
1.4. OBJECTIFS	12
2. Le risque sécheresse géotechnique (retrait-gonflement des sols argileux) en France	13
2.1. SINISTRES SECHERESSE ET COUT DU RETRAIT-GONFLEMENT	13
2.1.1. Coûts du retrait-gonflement entre 1989 et 2003 en France.....	13
2.1.2. Typologie des structures affectées.....	14
2.1.3. Coûts moyens des réparations des sinistres	15
2.1.4. Nombre de sinistres.....	16
2.2. CARTOGRAPHIE DE L’ALEA	18
2.2.1. Principaux facteurs intervenants	19
2.2.2. Programme de cartographie nationale	19
2.2.3. Extension de la cartographie	20
2.2.4. Carte provisoire de l’aléa.....	21
2.3. REPARTITION DES ENJEUX SUR LES ZONES D’ALEA.....	22
2.3.1. Type d’enjeux considérés.....	22
2.3.2. Choix d’une méthodologie	22
2.3.3. Description de la méthodologie retenue	23
2.3.4. Résultats.....	24
3. Hypothèses de changement climatique	25
3.1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ESTIME A L’ECHELLE DE LA FRANCE	25
3.2. INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE RETRAIT-GONFLEMENT	25
3.2.1. Extension géographique affectée	25
3.2.2. Intensité du phénomène	26
3.2.3. Fréquence des épisodes de « sécheresses géotechniques ».....	27

3.3. HYPOTHESES DE CHANGEMENT CLIMATIQUE RETENUES.....	27
3.3.1. Relation température moyenne estivale et nombre de sinistres	28
3.3.2. Evolution de la probabilité d'occurrence d'un évènement de type 2003 ..	28
3.3.3. Limites et incertitudes liées à cette approche	31
3.3.4. Synthèse	32
4. Evaluation de l'impact et du coût du changement climatique sur le retrait- gonflement des argiles	33
4.1. EVALUATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'ECHELLE NATIONALE	33
4.1.1. Objectifs	33
4.1.2. Données.....	34
4.1.3. Méthodologie.....	34
4.1.4. Résultats : première estimation des coûts induits et étude paramétrique	35
4.1.5. Conclusion	37
4.2. EVALUATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'ECHELLE DEPARTEMENTALE	37
4.2.1. Objectifs	37
4.2.2. Données.....	37
4.2.3. Méthodologie générale.....	38
4.2.4. Calcul des proportions de maisons individuelles sinistrées	38
4.2.5. Impact du changement climatique sur les maisons individuelles avec évolution de l'urbanisation à l'horizon 2030 et évaluation des coûts	40
4.2.6. Conclusions.....	43
4.3. LIMITES ET INCERTITUDES DES EVALUATIONS.....	43
5. Mesures d'adaptation envisagées, analyse des coûts	45
5.1. RAPPEL DES MESURES PREVENTIVES PRECONISEES	45
5.2. MESURES D'ADAPTATION ENVISAGEABLES A L'AVENIR.....	47
5.2.1. Evolutions prévisibles des sollicitations	47
5.2.2. Adaptation des fondations de maisons individuelles.....	48
5.2.3. Dispositions globales	50
5.3. PROJECTION DES COÛTS	51
5.4. EVALUATION DES MESURES D'ADAPTATION	52
6. Recommandations/Pistes d'action.....	55

6.1. AMELIORATION DE L'APPROCHE ECONOMIQUE	55
6.2. MEILLEURE CARACTERISATION DES PHENOMENES PHYSIQUES	55
6.3. RECOMMANDATIONS CONSTRUCTIVES.....	56
7. Conclusion	59
Bibliographie	61

Liste des illustrations

Illustration 1 – Coûts annuels moyens indemnisés avant 2003 et en 2003 par département	14
Illustration 2 - Répartition par exercice des sinistres indemnisés (données CCR et Boutin, 2007)	16
Illustration 3 – Nombre de sinistres actuellement recensés par départements par le BRGM dans le cadre de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement et pourcentage de sinistres datés	17
Illustration 4 – Répartition des sinistres collectés par le BRGM selon l'exercice considéré.....	18
Illustration 5 - Etat d'avancement au 2 octobre 2008 de la publication des cartes départementales d'aléa retrait-gonflement des sols argileux (source : http://www.argiles.fr , dernière mise à jour : 01/10/08)	20
Illustration 6 - Carte d'aléa retrait-gonflement nationale provisoire issue de l'agrégation des cartes d'aléa réalisées dans le cadre de la cartographie nationale et dans le cadre de la présente étude (source : BRGM)	21
Illustration 7 – Répartition de la superficie nationale selon son niveau d'aléa	22
Illustration 8 - Nombre de maisons individuelles par zone d'aléa dans chaque région, estimé à partir du recensement INSEE de 1999 (en milliers).....	24
Illustration 9 - Dommages estimés par la CCR dans le cadre du régime CatNat en fonction de l'écart de la température à la température moyenne (Données : Météo-France et Caisse Centrale de Réassurance).....	28
Illustration 10 – Rappel des limites identifiées des méthodologies utilisées jusqu'alors (source : DGEC).....	29
Illustration 11 – Comptages des « canicules » sur Arpège par intervalle de vingt ans	29
Illustration 12 – Ajustement des courbes de régression sur les données issues du modèle Arpège.....	30
Illustration 13 - Bornage du nombre de canicule aux différents horizons	31
Illustration 14 - Bornage des fréquences de canicule aux différents horizons	31
Illustration 15 - Récapitulatif des données économiques	34
Illustration 16 - Méthodologie appliquée dans le cadre de l'étude nationale du groupe de travail Sécheresse du RNACC.....	35

Illustration 17 – Coût annuel moyen estimés des dommages par période, sans urbanisation supplémentaire (étude à l'échelle nationale)	36
Illustration 18 - Les effets de l'urbanisation pour le scenario climatique A2 sur les coûts cumulés pour la période 2010-2030 (étude à l'échelle nationale).....	36
Illustration 19 - Les effets de l'urbanisation pour le scenario climatique B2 sur les coûts cumulés pour la période 2010-2030 (étude à l'échelle nationale).....	36
Illustration 20 – Répartition de la proportion annuelle de maisons individuelles sinistrées avant 2003 sur les zones présentant une susceptibilité non nulle à l'aléa retrait-gonflement	39
Illustration 21 - Répartition de la proportion de maisons individuelles sinistrées en 2003.....	39
Illustration 22 – Schéma de principe de la méthodologie appliquée dans le cadre de l'étude départementale du groupe de travail Sécheresse du RNACC	41
Illustration 23 - Les effets de l'urbanisation sur 2010-2030 (étude à l'échelle départementale) pour le scenario climatique A2	42
Illustration 24 - Les effets de l'urbanisation sur 2010-2030 (étude à l'échelle départementale) pour le scenario climatique B2	42
Illustration 25 - Principales préconisations émises dans le cadre des PPRN (source : BRGM)	46
Illustration 26 - Trois propositions techniques relatives aux fondations de l'habitation (Source INERIS)	48
Illustration 27 - Tableau comparatif des trois propositions d'amélioration visant les fondations	49
Illustration 28 - Coût des terrains en fonction de l'implantation.....	50
Illustration 29: Contraintes sur la probabilité "p" de sinistre, avec une valeur moyenne de sinistre de 10 000 euros	90
Illustration 30: Probabilité annuelle de sinistre par zone sur une année "bruit de fond"	90
Illustration 31: Contrainte sur la probabilité p de sinistre, avec une valeur moyenne de sinistre à 60 000 euros	90
Illustration 32: Probabilité annuelle de sinistre sur une année "type 2003"	91
Illustration 33: Probabilité moyenne de sinistre par zone.....	91

Liste des annexes

Annexe 1 - Coûts d'indemnisation des sinistres liés au retrait-gonflement des sols évalués sur la période 1989-2003 par la CCR et communiqués au 11/09/08
Annexe 2 - Nombre de maisons individuelles par zone d'aléa dans chaque département (Simulation SOES)
Annexe 3 - Détail du calcul des proportions de maisons individuelles sinistrées
Annexe 4 - Pourcentage de maisons individuelles sinistrées annuel par département pour l'année 2003 et entre 1989 et 2002 (Simulation BRGM)
Annexe 5 - Taux d'accroissement moyen de la population entre 1990 et 1999 par départements (données INSEE)
Annexe 6 - Détails sur la méthode de projection des coûts de l'adaptation (partie 5.3)

1. Introduction et rappels des objectifs

1.1. CADRE

En application du Plan Climat français (2006), un groupe de travail interministériel a été constitué en mars 2007 pour une durée de 2 ans sur le thème « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France », afin de procéder à une première évaluation des dommages attendus du fait du changement climatique et d'identifier des mesures permettant d'en limiter les impacts. Ce groupe plénier a vocation à fournir les lignes directrices méthodologiques et à garantir l'homogénéité de la méthode d'évaluation, laquelle est déclinée dans sept groupes de travail sectoriels dont le groupe intitulé « Risques Naturels, Assurances et coûts des mesures d'adaptation au Changement Climatique », dénommé GT RNACC. Ce groupe de travail est présidé par Thierry Hubert (MEEDDAT/DGPR/SRNH) et s'est réuni à plusieurs reprises à partir du 28 novembre 2007.

Le cadre de travail commun à tous les groupes est le suivant :

- deux scénarios climatiques pris en compte, l'un plutôt extrême noté A2 (dans la continuité des tendances actuelles avec utilisation prédominante des énergies fossiles et augmentation des disparités régionales) et le second, dénommé B2 (donnant la priorité au local et à la durabilité) étant dans la moyenne des différents scénarios élaborés ;
- trois horizons temporels : 2030, 2050 et 2100 ;
- des enjeux économiques supposés constants sur la période étudiée.

Parmi les risques naturels pris en compte dans ce cadre figure notamment la sécheresse géotechnique (retrait-gonflement des sols argileux).

1.2. PROBLEMATIQUE DU RETRAIT-GONFLEMENT

En France, les manifestations de ce phénomène ont été observées en particulier lors de la sécheresse de 1976 qui a été à l'origine de nombreux désordres concernant notamment des pavillons situés en région parisienne. Entre 1989 et 1992, de très nombreuses communes françaises ont été touchées par cette sinistralité, ce qui a conduit l'État à l'intégrer dans le dispositif des catastrophes naturelles instauré par la loi du 13 juillet 1982. Durant l'été 2003, plusieurs dizaines de milliers de maisons individuelles construites sur des sols argileux se sont fissurées à la suite de tassements différentiels dus au phénomène de retrait-gonflement, conduisant plus d'une commune française sur cinq à introduire une demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour cette période. Ce type de sinistres représente désormais en France le deuxième poste d'indemnisation au titre des catastrophes naturelles (Vincent, 2006).

Actuellement, l'ensemble des simulations climatiques réalisées, notamment dans le cadre du GIEC, se sont accordées sur une grande probabilité que la France connaisse, à l'horizon 2100, des étés plus secs associés à des températures plus élevées. Dans la mesure où les phénomènes météorologiques exceptionnels, et en particulier les périodes de sécheresse inhabituelle, constituent le principal facteur de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement, et étant donné le coût que représente ce type de sinistralité pour la collectivité en France, il apparaît important d'évaluer quel pourrait être l'impact des changements climatiques prévisibles sur ce phénomène dans les années à venir et quelles adaptations pourraient permettre de limiter la sinistralité des maisons individuelles due à ce phénomène, à quels coûts de mise en œuvre.

Pour cela un sous-groupe technique du GT RNACC a été constitué.

1.3. CONTRIBUTEURS

Ce sous-groupe de travail, désigné sous le nom de RNACC RG, a été constitué à l'initiative du MEEDDAT/DGPR/SRNH sous la coordination technique du BRGM et a regroupé des experts issus des différents organismes cités ci-dessous (dans l'ordre alphabétique) :

BRGM : Le BRGM est l'établissement public de référence dans le domaine des Sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol. Au sein du service Aménagements et Risques Naturels, l'unité Risques Mouvements de Terrain est notamment chargée de cartographier sur l'ensemble du territoire métropolitain l'aléa lié au retrait-gonflement des sols argileux et coordonne différents projets de recherche sur cette thématique. Le BRGM a présidé les travaux du groupe de travail du RNACC sur le risque sécheresse, a proposé des hypothèses de changement climatique et a effectué l'étude d'évaluation de l'impact du changement climatique à l'échelle départementale.

CSTB : créé en 1947, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment est un établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle conjointe du ministre du Logement et du ministre de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction. Les missions du CSTB s'exercent dans les trois domaines suivants :

- Recherches scientifiques et techniques et expertises pour le secteur de la construction et le logement
- Amélioration de la qualité des constructions et de son environnement
- Amélioration de l'information des professionnels

Un projet pluridisciplinaire « impact du changement sur le cadre bâti » (IC3B) est en cours au CSTB depuis 2002.

INERIS : L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques a pour mission de contribuer à la prévention des risques que les activités économiques font peser sur la santé, la sécurité des personnes et des biens, et sur l'environnement. Il mène des programmes de recherche visant à mieux comprendre les phénomènes susceptibles de conduire aux situations de risques ou d'atteintes à l'environnement et à

la santé, et à développer sa capacité d'expertise en matière de prévention. Ses compétences scientifiques et techniques sont mises à la disposition des pouvoirs publics, des entreprises et des collectivités locales afin de les aider à prendre les décisions les plus appropriées à une amélioration de la sécurité environnementale. Créé en 1990, l'INERIS est un établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire. Il emploie 600 personnes, basées principalement à Verneuil-en-Halatte, dans l'Oise. Site Internet : www.ineris.fr.

MEEDDAT / CGDD : Le commissariat général au développement durable (CGDD) a pour vocation d'élaborer, de faciliter la mise en œuvre et de veiller au suivi de la stratégie nationale de développement. Au sein du CGDD, le Service de l'observation et des statistiques (SOeS) a pour mission de produire, analyser et synthétiser l'information statistique sur le développement durable.

Météo-France : Météo-France est l'Établissement Public Administratif chargé de la météorologie opérationnelle (observation, prévision, recherche, ...) au service de la sécurité des personnes et des biens (missions institutionnelles), de la climatologie, mais aussi d'activités commerciales pour répondre aux besoins précis des utilisateurs et des clients. Depuis quelques années, il est également impliqué dans la recherche sur le changement climatique et participe activement aux travaux du GIEC.

Au sein de la Direction des Missions Institutionnelles et Affaires Internationales de Météo-France, le Département des Missions Institutionnelles, présent dans les différents groupes de travail du RNACC, est le contact avec les partenaires en charge de la sécurité civile, la sécurité nucléaire, la pollution atmosphérique, le service des crues, les affaires maritimes et la sécurité en mer, la sécurité routière, la santé et l'action sociale, le développement durable, ...

MRN : L'association « Mission Risques Naturels » ou MRN a été créée début 2000 entre la FFSA et le GEMA, après une année particulièrement sinistrée par des événements catastrophiques naturels (inondations et tempêtes). Il s'agit en effet pour la profession de l'assurance de contribuer à une meilleure connaissance des risques naturels et d'apporter une contribution technique aux politiques de prévention.

Au sein de ces organismes, les personnes suivantes ont participé :

- BRGM : N. Lenotre, M. Vincent, E. Plat
- CSTB : J.L. Salagnac
- INERIS : J.B. Kazmierczak
- MEEDDAT / CGDD / SEEIDD : C. Peinturier
- MEEDDAT / CGDD / SOeS : B. Poupat et P. Dorelon
- MEEDDAT/DGPR/SRNH : F. Hédou
- Météo-France : P. Chassagneux
- MRN : R. Nussbaum, J. Chemitte et S. Gerin,

Le groupe de travail ainsi constitué s'est réuni à trois reprises, les 1er juillet, 16 septembre et 1er décembre 2008 avec des séances de travail plus spécifiques entre certains partenaires en tant que de besoin.

1.4. OBJECTIFS

Le présent document constitue le rapport de synthèse de l'expertise collective réalisée par la subdivision « retrait-gonflement des sols argileux » du groupe de travail « Risques naturels, assurances et mesures d'adaptation au changement climatique ». Ce rapport de synthèse présente tout d'abord le risque sécheresse en France et évalue notamment la répartition spatiale de l'aléa à l'échelle nationale ainsi que la sinistralité observée et les méthodes d'information préventive mises en œuvre. Il présente ensuite les hypothèses de changement climatique prises en compte dans l'étude. Ensuite, deux évaluations complémentaires de l'impact du changement climatique sont présentées : l'une à l'échelle nationale calquée sur la méthode mise en œuvre dans l'annexe technique du rapport « Financial Risk of Climate Change » commandé par l'Association des Assureurs Britanniques (ABI) et, l'autre, à l'échelle départementale qui s'appuie sur des données supplémentaires que sont les cartes d'aléa retrait-gonflement à l'échelle départementale. Une quatrième partie identifie des mesures d'adaptation possibles et tente de les évaluer. Enfin, sont proposés un certain nombre de recommandations et de pistes d'action.

2. Le risque sécheresse géotechnique (retrait-gonflement des sols argileux) en France

Le retrait-gonflement des sols argileux est un phénomène naturel dû pour l'essentiel à des variations de volume de sols argileux sous l'effet de l'évolution de leur teneur en eau. Ces variations de volume, hétérogènes au niveau du sol d'assise des bâtiments, se traduisent notamment, en période de sécheresse, par des tassements différentiels de nature à provoquer des désordres affectant principalement le bâti individuel.

Une première partie caractérise la sinistralité engendrée par le phénomène telle qu'elle a été observée en France depuis une vingtaine d'années et évalue les coûts qui leur sont associés. Dans une seconde partie sont présentées les cartes d'aléa retrait-gonflement réalisées pour servir de support aux politiques de prévention de ce risque particulièrement coûteux pour la collectivité. Enfin, une troisième partie évalue la manière dont sont exposées les constructions actuelles aux différents niveaux d'aléa identifiés.

2.1. SINISTRES SECHERESSE ET COUT DU RETRAIT-GONFLEMENT

2.1.1. Coûts du retrait-gonflement entre 1989 et 2003 en France

Les données communiquées par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) en septembre 2008 indiquent que le coût d'indemnisation dans le cadre du régime des catastrophes naturelles (dit « CatNat ») s'élève à 3,9 milliard d'euros au cours de la période 1989-2003 dont 1 milliard en 2003 (annexe 1). De plus, le coût de la procédure exceptionnelle (procédure mise en œuvre dans le cadre de la loi de finances 2006 pour indemniser les sinistres survenus en 2003 dans des communes qui n'avaient pas pu être reconnues en état de catastrophe naturelle sécheresse) s'élève à 218 millions pour l'été 2003. Ces coûts ne concernent que les maisons individuelles, seules structures pour lesquelles ils sont disponibles (paragraphe 2.1.2).

L'illustration 1 présente les coûts annuels moyens par département avant 2003 et en 2003 (ces derniers intégrant également la procédure exceptionnelle) issues des données fournis par la CCR et figurant dans le rapport Boutin (2007).

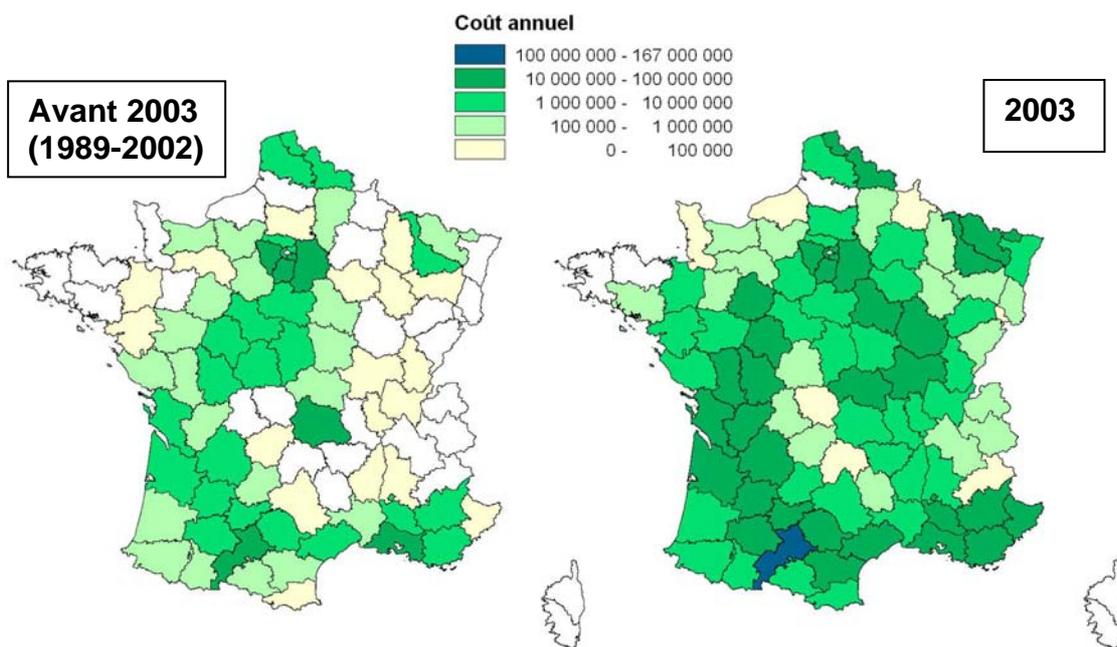


Illustration 1 – Coûts annuels moyens indemnisés avant 2003 et en 2003 par département

Cette illustration confirme que les coûts annuels moyens par département ont fortement augmenté pour l'année 2003 et que la quasi-totalité des départements a été concernée par le phénomène. Sur l'ensemble de la France métropolitaine, les coûts annuels moyens étaient d'environ 200 millions d'euros avant 2003 et sont passés à un peu plus de 1,2 milliard d'euros pour le seul exercice 2003.

Toutefois, ces coûts intègrent uniquement les sinistres indemnisés dans le cadre du régime CatNat et de la procédure exceptionnelle mais ne prend pas en compte les sinistres restant à la charge des particuliers (non déclarés ou non indemnisés) ou des entreprises (garantie décennale). D'après les éléments communiqués par la CCR, pour l'année 2003, si la totalité des communes demanderesse avaient été retenues, le risque financier global aurait pu atteindre près de 3 500 M€, dont 60 à 70% auraient été supportés par la CCR elle-même, en raison des traités de réassurance en quote-part et en stop-loss (Dumas *et al.*, 2005).

2.1.2. Typologie des structures affectées

Le phénomène de retrait-gonflement affecte principalement les maisons individuelles. Des cas de sinistre concernant notamment des chaussées routières et certains ouvrages enterrés (canalisations), ainsi que quelques bâtiments publics et privés ont été signalés mais les données permettant d'évaluer l'impact financier des dégradations concernant les ouvrages autres que les maisons individuelles ne sont pas disponibles pour la France.

Différentes enquêtes menées pour évaluer plus précisément la nature des constructions affectées (Vincent *et al.*, 2006) confirment que les maisons individuelles sont les principales victimes du phénomène et permettent d'identifier les principaux éléments de vulnérabilité de ces constructions. Les structures majoritairement impactées par le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux sont des pavillons :

- de type R+0 (sans étage) ou R+1 (habitation avec un seul étage),
- fondés sur semelles filantes,
- avec dallage sur terre-plein (ou sous-sol partiel),
- fondés de manière superficielle (souvent à moins de 60 cm) et parfois hétérogène.

Dans la suite de l'étude et faute de données concernant notamment l'impact économique du phénomène sur les infrastructures routières, **seuls les sinistres concernant les maisons individuelles seront pris en compte.**

2.1.3. Coûts moyens des réparations des sinistres

Les réparations des sinistres dus au retrait-gonflement peuvent être de différentes natures : il peut s'agir de reprises de fissures, de réparations concernant la structure ou encore des reprises en sous-œuvre (par pieux, micropieux, plots ou injections de résines). Ainsi, les coûts de ces réparations sont variables en fonction de leur nature (d'ordre esthétique ou structurel).

En septembre 2008, la CCR mentionne un coût moyen d'indemnisation des sinistres dans le cadre de la procédure CatNat de 10 900 € pour la période 1989-2002 et de 10 200 € pour l'année 2003, alors qu'il s'élèverait à 17 800 € dans le cadre de la procédure exceptionnelle (Boutin, 2007). Ces coûts moyens n'incluent pas la franchise de 1 500 € restant à la charge des sinistrés qui bénéficient d'une indemnisation (en régime CatNat comme dans le cas de la procédure exceptionnelle). Ces coûts sont très faibles ce qui semble indiquer le nombre important de réparation de faibles importances. En effet, les coûts moyens de réparation plus lourde telle qu'une reprise en sous-œuvre s'élèvent couramment à des valeurs comprises entre 10 000 et 70 000 euros (Arbizzi et Kreziak, 2009 en annexe du rapport du projet ANR-ARGIC¹ : Vincent *et al.*, 2009).

Ces coûts moyens des sinistres sont vraisemblablement variables selon les départements et localement sous-évalués, notamment en Ile-de-France où ce coût serait sensiblement plus élevé, de l'ordre de 55 000 € d'après les estimations du Laboratoire Régional de l'Est Parisien. En revanche, dans le grand-ouest, ces coûts

¹ ARGIC (Analyse du Retrait-Gonflement et des ses Incidences sur les Constructions) : programme de recherche initié en février 2006 pour une période de 3 ans, cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche (Programme Réseau Génie Civil et Urbain), coordonné par le BRGM avec la participation du LCPC, de Météo-France, de l'INERIS, de l'INRA, de Fondasol, du LAEGO (INPL), du LMSSMat (ECP), du Centre de Géosciences (Armines), du CERMES (ENPC), du GHYMAC (Bordeaux 1), du LGCIE (Insavalor) et du LEA-HydrASA (Université de Poitiers).

sont de l'ordre de 11 000 € d'après le Laboratoire Régional d'Angers (Arbizzi et Kreziak, 2009 en annexe du rapport du projet ANR-ARGIC² : Vincent *et al.*, 2009).

2.1.4. Nombre de sinistres

Le nombre de sinistres survenus en France peut être calculé à partir de deux sources complémentaires de données. D'une part, il peut être déterminé à partir de l'estimation des coûts d'indemnisation par exercice. D'autre part, à partir des sinistres recensés par le BRGM dans le cadre des opérations de cartographie de l'aléa retrait-gonflement (paragraphe 2.2), dans les départements traités.

a. Evaluation du nombre de sinistres à partir des coûts d'indemnisation

L'illustration 2 présente la répartition des sinistres par exercice entre 1989 et 2003 : le nombre de sinistres par exercice a été évalué à partir du coût moyen des sinistres et des coûts totaux de l'indemnisation CatNat pour la période 1989-2002. Pour l'exercice 2003, le nombre de dossiers éligibles dans le cadre de la procédure exceptionnelle de reconnaissance 2003 y a été ajouté (Boutin, 2007).

Le nombre de sinistres estimé de cette manière s'élèverait ainsi à 375 000 dont environ un tiers (soit un peu moins de 115 000) pour la seule année 2003.

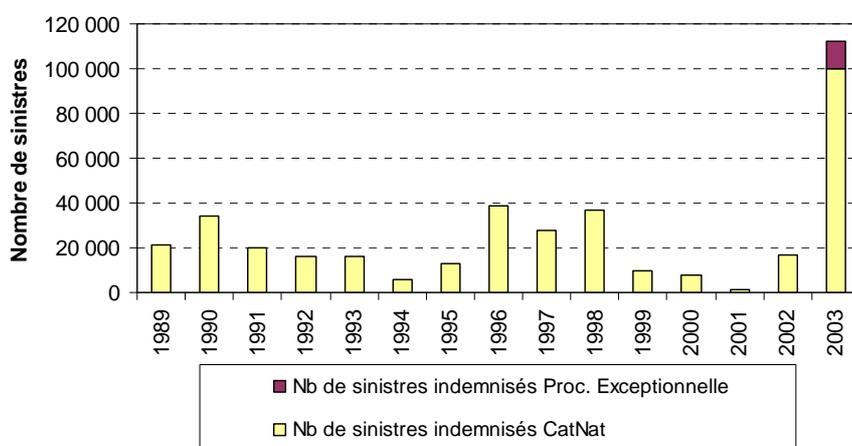


Illustration 2 - Répartition par exercice des sinistres indemnisés (données CCR et Boutin, 2007)

² ARGIC (Analyse du Retrait-Gonflement et des ses Incidences sur les Constructions) : programme de recherche initié en février 2006 pour une période de 3 ans, cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche (Programme Réseau Génie Civil et Urbain), coordonné par le BRGM avec la participation du LCPC, de Météo-France, de l'INERIS, de l'INRA, de Fondasol, du LAEGO (INPL), du LMSSMat (ECP), du Centre de Géosciences (Armines), du CERMES (ENPC), du GHYMAC (Bordeaux 1), du LGCIE (Insavalor) et du LEA-HydrASA (Université de Poitiers).

L'estimation du nombre de sinistres à partir des coûts d'indemnisation présente l'avantage de fournir un chiffrage même approximatif pour l'ensemble des départements métropolitains, par contre, elle ne permet pas de connaître la répartition de ces sinistres par zone d'aléa. Celle-ci peut en revanche être appréhendée à travers les sinistres qui sont systématiquement recensés par le BRGM dans le cadre de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement et qui font l'objet d'une localisation spatiale fine (géoréférencement).

b. Sinistres recensés par le BRGM

Dans le cadre des opérations de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux (paragraphe 2.2.2), le BRGM a collecté à ce jour plus de 96 000 sinistres répartis dans 58 départements, soit environ quatre fois moins de sinistres que dénombré à partir des coûts d'indemnisations (paragraphe précédent) sur ces départements. Ce décalage peut sans-doute s'expliquer par le fait que la base de données des sinistres est incomplète pour un certain nombre de départements (étude finalisée avant 2003, interrogation uniquement des communes CatNat pour les départements dont la cartographie de l'aléa retrait-gonflement a été réalisée précocement, absence de réponse de certaines communes...).

L'illustration 3 présente le nombre de sinistres actuellement recensés par le BRGM dans les départements déjà couverts par la cartographie de l'aléa retrait-gonflement ainsi que le pourcentage de sinistres datés, tandis que l'illustration 4 présente l'histogramme de la répartition des sinistres selon la date d'apparition des premiers désordres, sachant qu'au total, environ 32 000 des 96 000 recensés par le BRGM sont datés.

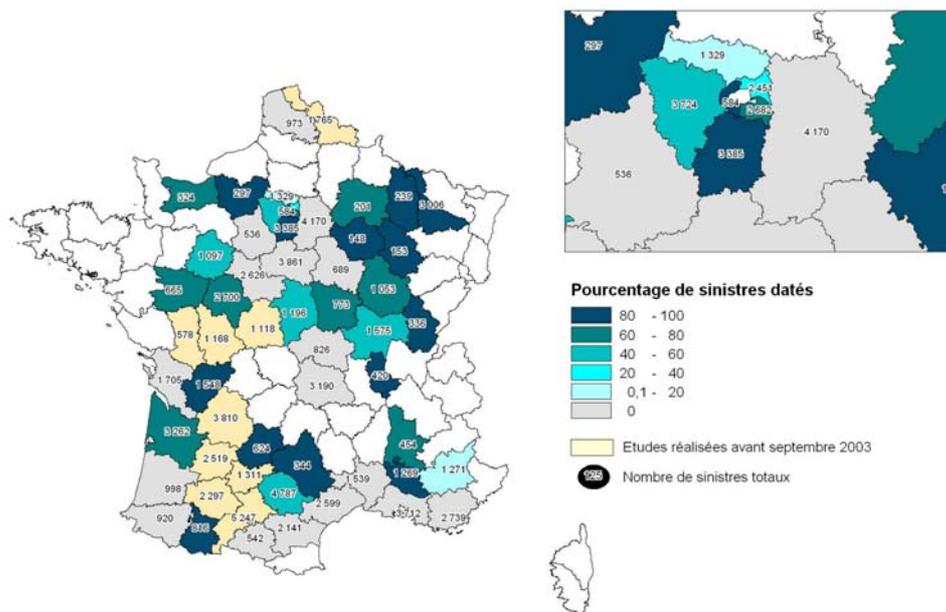


Illustration 3 – Nombre de sinistres actuellement recensés par départements par le BRGM dans le cadre de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement et pourcentage de sinistres datés

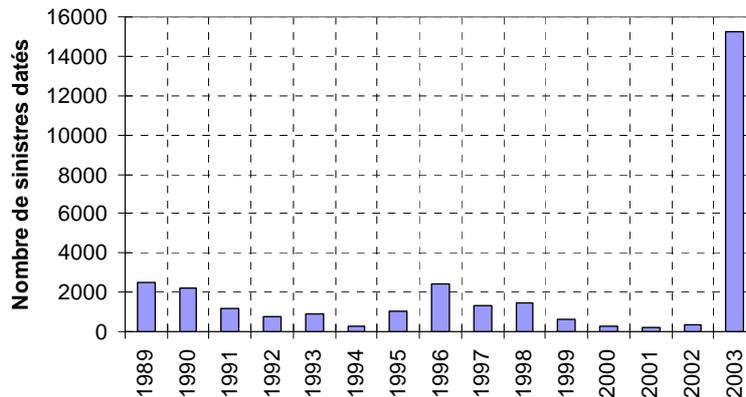


Illustration 4 – Répartition des sinistres collectés par le BRGM selon l'exercice considéré

D'après l'illustration 4, environ la moitié des sinistres se seraient produits en 2003. Cette estimation pourrait être légèrement surestimée compte tenu des effets d'annonce concernant la sécheresse 2003 et des différentes dates de réalisation des études qui sont comprises entre 1998 et 2008, mais on retrouve une répartition assez comparable à celle de l'illustration 2, avec un pic majeur en 2003 et un bruit de fond assez homogène entre 1989 et 2002, marqué par des pics secondaires (1989-91 et 1996-98) peu prononcés.

À l'échelle nationale, la répartition des sinistres sur les zones d'aléa retrait-gonflement cartographiées par le BRGM dans le cadre du programme national (paragraphe 2.2.2) est la suivante : environ 37 % des sinistres sont situés en zone d'aléa faible, 49,7 % en zone d'aléa moyen et 13,26 % en zone d'aléa fort (pourcentages par rapport au nombre de sinistres effectivement présents sur des zones d'aléa faibles à fortes) alors que ces zones représentent respectivement 80 %, 18 % et 2 % (pourcentages par rapport aux superficies des zones classées en aléa faible à fort).

Il est à noter qu'un peu plus de 5 % des sinistres se situent en zone d'aléa nul (ce pourcentage ne dépasse cependant pas 1 à 3 % dans la plupart des départements traités, à l'exception de quelques départements pour lesquels la carte d'aléa retrait-gonflement a été réalisée au début du programme et qui mériteraient peut-être une actualisation dans certains secteurs).

2.2. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

Les sinistres dus au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux constituent désormais en France le deuxième poste d'indemnisation au titre des catastrophes naturelles alors que de nombreux désordres pourraient probablement être évités, moyennant le respect de quelques règles préventives de construction. C'est pourquoi le Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire (MEEDDAT) a confié au BRGM un programme de cartographie de l'aléa retrait-gonflement pour localiser les zones dans lesquelles la probabilité d'occurrence du phénomène est élevée et élaborer, dans les communes les

plus touchées, des Plans de prévention des risques naturels (PPRn) afin d'y imposer des règles constructives préventives.

Après un rapide rappel des principaux facteurs conditionnant le phénomène sont présentés ici l'état actuel d'avancement du programme national de cartographie de l'aléa puis la démarche ayant permis d'élaborer, dans le cadre de la présente étude, une carte provisoire de l'aléa, extrapolée à l'ensemble de la France métropolitaine.

2.2.1. Principaux facteurs intervenants

Parmi les facteurs qui entrent en jeu dans le phénomène de retrait-gonflement, on distingue classiquement des facteurs de prédisposition et des facteurs de déclenchement.

- Les facteurs de prédisposition sont ceux dont la présence induit le phénomène de retrait-gonflement, mais ne suffit pas à elle seule à le déclencher. Ces facteurs sont fixes ou évoluent très lentement avec le temps. Parmi eux, on compte la nature du sol, le contexte hydrogéologique, la géomorphologie, la végétation et les défauts de construction.
- Les facteurs de déclenchement sont ceux dont la présence provoque le phénomène de retrait-gonflement, mais qui n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. Les deux principaux facteurs de déclenchement sont les phénomènes climatiques et les facteurs anthropiques. La connaissance des facteurs déclenchant permet de déterminer l'occurrence du phénomène, autrement dit l'aléa et non plus seulement la susceptibilité.

2.2.2. Programme de cartographie nationale

La corrélation étroite mise en évidence entre la répartition des sinistres et la nature géologique des formations sub-affleurantes a amené le BRGM, dès le milieu des années 1990, à élaborer des développements méthodologiques en vue de cartographier l'aléa retrait-gonflement des sols argileux, d'abord à l'échelle communale (Manosque), puis à l'échelle départementale (Alpes-de-Haute-Provence), plus adaptée à une cartographie de l'aléa de grande extension (Vincent *et al.*, 2007). A cette échelle, les facteurs ponctuels de prédisposition ou de déclenchement que sont notamment la végétation arborée, le contexte hydrogéologique, les actions anthropiques ou les défauts de construction, n'ont pas été pris en compte dans la cartographie car leur impact est purement local et ne peut être cartographié à une échelle départementale.

La réalisation de ces cartes à l'échelle départementale s'appuie donc pour l'essentiel sur la connaissance actuelle des formations argileuses superficielles, issue principalement des cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000. Pour chacune de ces formations est déterminé le niveau de susceptibilité au phénomène, évalué à partir de critères lithologique, minéralogique et géotechnique. Afin d'approcher, au moins de manière qualitative l'aléa, soit la probabilité d'occurrence du phénomène, la susceptibilité au retrait-gonflement est ensuite corrigée en intégrant également la sinistralité observée depuis 1989. La carte d'aléa résulte ainsi de la

combinaison de la note de susceptibilité et de la note de sinistralité en affectant toutefois un poids moindre à cette dernière.

Ce programme de cartographie de l'aléa, dont la réalisation était initialement prévue uniquement dans les départements les plus touchés, a fait l'objet d'une extension suite à la forte sinistralité de l'été 2003 et une couverture complète de l'ensemble du territoire métropolitain est désormais programmée pour fin 2010 (Vincent *et al.*, 2008). A fin septembre 2008, ces cartes d'aléa étaient d'ores et déjà réalisées pour 47 départements et accessibles au public sur internet pour 43 d'entre eux (Illustration 5).

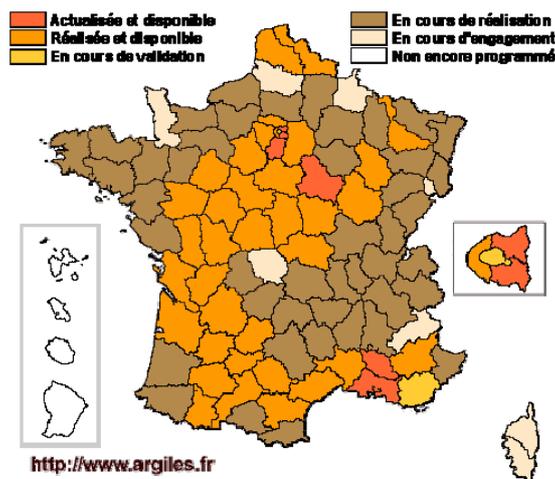


Illustration 5 - Etat d'avancement au 2 octobre 2008 de la publication des cartes départementales d'aléa retrait-gonflement des sols argileux (source : <http://www.argiles.fr>, dernière mise à jour : 01/10/08)

2.2.3. Extension de la cartographie

Pour les besoins de la présente étude, la cartographie de l'aléa a été étendue de manière anticipée aux départements encore non traités dans le cadre du programme national. Sur ces départements, les coûts d'indemnisation étant relativement faibles (moins de 9 % du coût total indemnisé dans le cadre du régime des catastrophes naturelles et environ 12 % du coût total indemnisé en incluant la procédure exceptionnelle 2003), il a été décidé de procéder selon une méthodologie simplifiée en utilisant la carte géologique de la France à 1/1 000 000, moins précise que les cartes à 1/50 000 utilisées dans le cadre de la cartographie nationale.

Pour l'extension de la carte d'aléa, les niveaux d'aléa ont été extrapolés à partir des départements limitrophes : 446 formations ont ainsi été interprétées et quelques unes redécoupées, notamment les formations reconnues comme très sujettes au retrait-gonflement.

2.2.4. Carte provisoire de l'aléa

L'illustration 6 présente la carte d'aléa nationale réalisée spécifiquement pour servir de support aux réflexions du présent groupe de travail. Pour les 47 départements dont la carte d'aléa était disponible à fin septembre 2008, c'est la carte valide à l'échelle 1/50 000 qui a été retenue, et pour les autres, la carte d'aléa résulte de l'extrapolation (cf. paragraphe 2.2.3). La carte départementale d'aléa retrait-gonflement du Var (programme national), affichée en cours de validation sur l'illustration 5, a été intégrée et est donc traitée à 1/50 000.

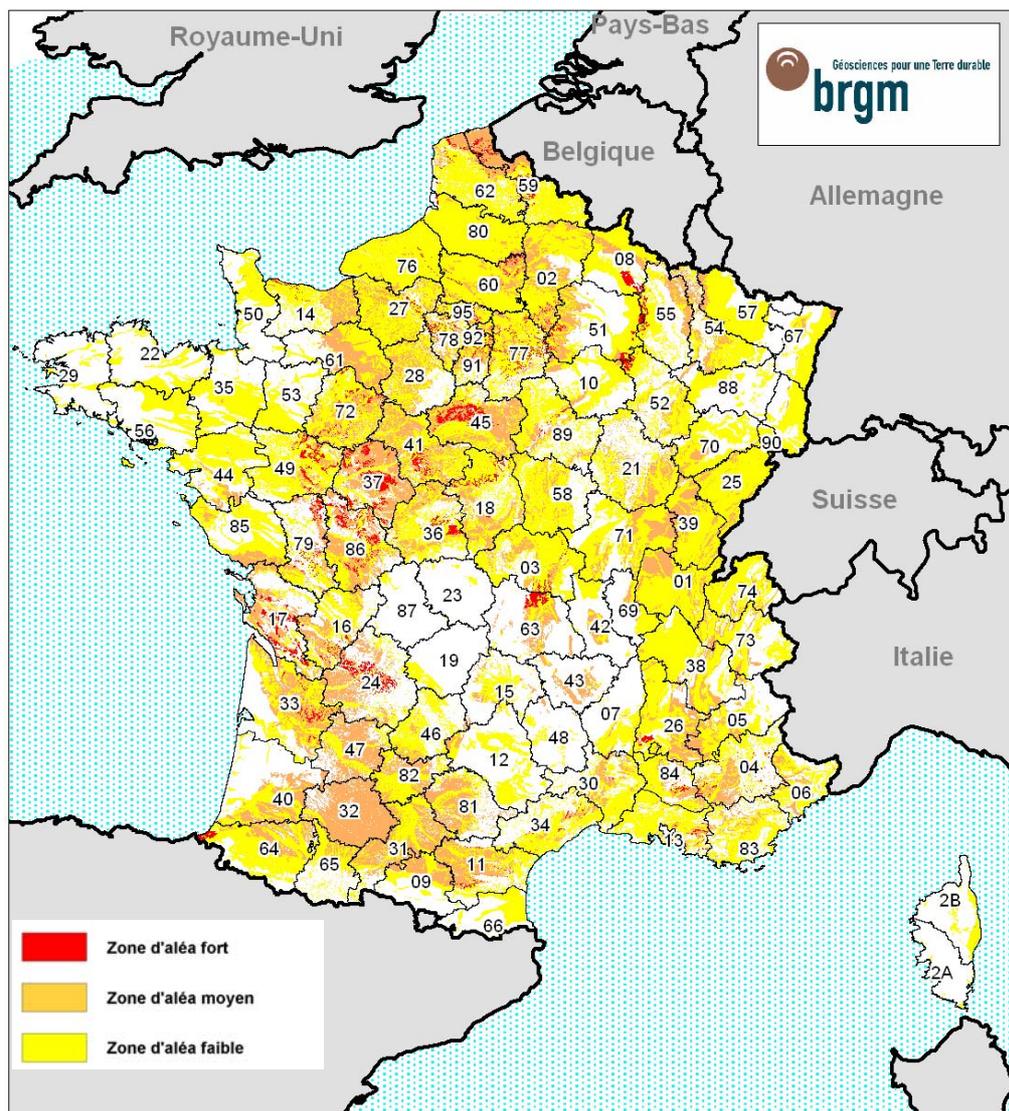


Illustration 6 - Carte d'aléa retrait-gonflement nationale provisoire issue de l'agrégation des cartes d'aléa réalisées dans le cadre de la cartographie nationale et dans le cadre de la présente étude (source : BRGM)

La carte nationale ainsi obtenue, qui représente une superficie métropolitaine totale de 543 965 km² (calcul effectué sous MapInfo en coordonnées cartésiennes à partir des données de la BD CARTO© de l'IGN), voit 42,3 % de son territoire classé en aléa faible, 16,5 %, classé en aléa moyen et 1,7 % classé en aléa fort (Illustration 7).

	Aléa faible	Aléa moyen	Aléa fort	Total
Superficie (km²)	230 097	89 754	9 247	329 099
Pourcentage de la superficie nationale	42,30%	16,5 %	1,7 %	60,50%

Illustration 7 – Répartition de la superficie nationale selon son niveau d'aléa

Malgré ses limites, et notamment dans les zones traitées à 1/1 000 000, elle fournit une première indication quant à la répartition des zones sujettes au retrait-gonflement à l'échelle nationale et peut donc servir de base pour évaluer l'impact des changements climatiques vis-à-vis du retrait-gonflement.

2.3. REPARTITION DES ENJEUX SUR LES ZONES D'ALEA

Le croisement de cette carte nationale de l'aléa retrait-gonflement avec la répartition géographique des structures exposées, et principalement des maisons individuelles qui sont principalement concernées permet d'appréhender le risque encouru.

2.3.1. Type d'enjeux considérés

En première approximation et étant donné le manque de données disponibles concernant les autres structures impactées par le phénomène (paragraphe 2.1.2), **seules les maisons individuelles seront ici prises en compte.**

Une analyse rigoureuse de la sinistralité exigerait de rapporter le nombre de sinistres recensés à l'échantillon constitué des seules maisons individuelles qui présentent les caractéristiques de vulnérabilité évoquées plus haut (paragraphe 2.1.2). Malheureusement, les données statistiques ne sont pas disponibles à l'échelle nationale pour procéder à une telle sélection et c'est pourquoi l'étude sera réalisée en se rapportant à l'ensemble des maisons individuelles. Cette hypothèse est d'ailleurs justifiée si l'on considère que la qualité de la construction n'évoluera pas de manière significative au cours de la période étudiée et que la proportion de maisons plus particulièrement vulnérables restera donc sensiblement identique.

2.3.2. Choix d'une méthodologie

Afin de connaître la répartition des maisons individuelles par zones d'aléa et par département, plusieurs méthodes ont été envisagées :

- l'estimation à l'échelle communale au *pro rata* surfacique du département semble conduire à un résultat trop aléatoire ;

- l'exploitation manuelle des bordereaux du recensement fournirait un résultat précis mais ne peut être envisagée pour cette étude compte tenu du temps imparti ;
- la détermination d'un critère de « bâtiment individuel » appliqué à la couche « bâti » de la BD TOPO©³ se révélerait coûteux du fait de l'acquisition de ces données à l'échelle de la France entière et peu fiable car elle ne pourrait pas permettre de distinguer des maisons mitoyennes de hangars par exemple ;
- l'estimation de densités de logements par zone IRIS⁴ (Ilots regroupés pour l'information statistique), déjà réalisée par le SOeS pour l'estimation des enjeux exposés aux inondations (Dorelon et Poupat, 2008), basée sur une carte du tissu urbain et les données de l'INSEE, semble satisfaisante pour cette étude.

2.3.3. Description de la méthodologie retenue

L'estimation du nombre de logements soumis au risque de gonflement-retrait des sols argileux, a été réalisé par le SOeS selon la méthode déjà mise en œuvre pour le risque inondation (Dorelon et Poupat, 2008) et comprend deux étapes : l'estimation de la densité de logements par type d'occupation du sol et par zone IRIS puis sa conversion en nombre de logements individuels.

La première étape, réalisée grâce à un système d'information géographique, est fondée sur un croisement géométrique des contours IRIS, des données Corine Land Cover (inventaire de l'occupation des sols à l'échelle européenne, à partir d'images satellitaires) corrigée à l'aide de la BD CARTO© de l'IGN. Ce premier traitement permet de déterminer, pour chaque zone IRIS, les types de surface Corine Land Cover associées (tissu urbain continu) puis d'en déduire les densités de logements par régression linéaire. Ensuite, pour chaque zone IRIS sont calculées les superficies correspondant aux différentes zones d'aléa retrait-gonflement à partir de la carte d'aléa étendue à l'échelle nationale. On en déduit alors, par pro rata surfacique, en appliquant les densités calculées précédemment, le nombre de logements pour chaque niveau d'aléa de chaque zone IRIS. Enfin, pour estimer le nombre de maisons individuelles, il a été procédé à un calcul de pro rata communal : le nombre de maisons exposées pour chaque zone d'aléa de chaque IRIS est supposé proportionnel au nombre de logements individuels communal. Enfin, ces données obtenues à l'échelle de la zone IRIS sont agrégées au niveau départemental.

³ La couche « bâti » de la BD TOPO© représente l'implantation des bâtiments numérisée à partir des Scan25© de l'IGN

⁴ Les contours IRIS sont un zonage géographique infra-communal (actuellement fondé sur le recensement de 1999) constitué de sommes d'ilots qui regroupent entre 1800 et 5000 personnes et concernant l'ensemble des communes de plus de 10 000 habitants ainsi que la majeure partie des communes de plus de 5 000 habitants. L'IRIS coïncide avec la commune lorsque celle-ci est trop petite pour être ainsi découpée.

2.3.4. Résultats

La France métropolitaine compte environ 28,7 millions de logements dont 15,9 millions de logements individuelles⁵ (recensement de 1999). Le croisement avec la carte d'aléa retrait-gonflement extrapolée à l'échelle nationale conduit à estimer à 11,2 millions le nombre de maisons individuelles exposées au risque de retrait-gonflement des sols argileux. La répartition de ces maisons individuelles par zone d'aléa à l'échelle nationale figure sur l'illustration 8. Le nombre de maisons individuelles exposées à un aléa fort s'élève ainsi à 394 400 au niveau national. Toutefois, dans le cadre de l'étude, les résultats ont été détaillés à l'échelle départementale (annexe 2), échelle minimale à laquelle ils sont statistiquement significatifs (Dorelon et Poupat, 2008).

	Aléa faible	Aléa moyen	Aléa fort	Total
Nombre de maisons individuelles (en milliers)	8 244	2 537	394	11 175
Pourcentage par rapport au nombre total de maison à l'échelle nationale	51,80%	16,00%	2,50%	70,20%

Illustration 8 - Nombre de maisons individuelles par zone d'aléa dans chaque région, estimé à partir du recensement INSEE de 1999 (en milliers)

⁵ Définition « logement individuel » : Un logement individuel est une [construction](#) qui ne comprend qu'un logement (maison). (Source : www.insee.fr/ au 17/09/08)

3. Hypothèses de changement climatique

3.1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ESTIME A L'ECHELLE DE LA FRANCE

L'objet de ce chapitre est de présenter et de justifier les hypothèses de changement climatiques qui ont été retenues dans le cadre de cette étude.

Malgré toutes les incertitudes liées aussi bien à la qualité des modèles qu'aux hypothèses socio-économiques adoptées, toutes les simulations actuellement disponibles montrent qu'il y a une grande probabilité que la France à la fin du XXI^{ème} siècle connaisse des hivers plus pluvieux avec des pluies intenses plus importantes, en particulier sur le nord et des étés plus secs associés à des températures plus élevées. **La France va continuer à se réchauffer, accompagné de sécheresses estivales plus fréquentes, plus longues et plus intenses.**

3.2. INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE RETRAIT-GONFLEMENT

L'étude de l'influence du changement climatique sur le retrait-gonflement soulève les questions suivantes :

- le phénomène va-t-il s'intensifier ? Affectera-t-il les constructions actuellement épargnées présentant par exemple des fondations plus profondes ? Engendrera-t-il des désordres plus conséquents sur les maisons sinistrées ?
- l'extension géographique affectée par le retrait-gonflement va-t-elle être modifiée ?
- quel sera l'impact de l'augmentation de la fréquence des sécheresses sur les désordres occasionnés ?

3.2.1. Extension géographique affectée

En été 2003, il est apparu que la quasi-totalité du territoire métropolitain avait été affectée par le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux puisque plus de 8 800 communes françaises ont déclaré des sinistres sur leur territoire, y compris dans le nord-est de la France, jusqu'alors largement épargné. Cet épisode a clairement mis en évidence que les différences climatiques régionales pouvaient se trouver largement gommées lors d'un tel épisode climatique, seules les zones non argileuses se trouvant alors à l'abri de ce type de sinistralité.

Il en résulte qu'il n'y a aucune raison *a priori*, au vu de l'état actuel des connaissances sur le déclenchement de ce phénomène, d'envisager une modification du zonage exposé en fonction du changement climatique attendu puisque c'est déjà l'ensemble

du territoire métropolitain qui est susceptible d'être concerné. En revanche, la répartition spatiale de la sinistralité observée depuis 1989 et singulièrement au cours de l'épisode exceptionnel de l'été 2003, est étroitement corrélée à la nature géologique des terrains affleurants à sub-affleurant et c'est donc ce critère qu'il a été jugé préférable de prendre en compte, comme c'est le cas dans les cartes d'aléa établies jusqu'à présent.

La carte d'aléa retrait-gonflement des sols argileux telle que décrite précédemment (paragraphe 2.2.4) s'appuie ainsi essentiellement sur la nature géologique des sols qui ne devrait pas évoluer en termes de texture et minéralogie à l'échelle de temps considérée dans la présente étude (EEA, 2008). Il est certes possible que certains facteurs de prédisposition, tels que la végétation et le contexte hydrogéologique soient modifiés. Cependant, il est guère envisageable de prendre en compte ces paramètres très locaux dans le cadre de cette étude, pour les mêmes raisons qui ont amené à ne pas les retenir dans la démarche de cartographie de l'aléa mise en œuvre jusqu'à présent.

Ainsi, **l'extension géographique** du phénomène telle que délimitée par les cartes d'aléa retrait-gonflement **est supposée ne pas évoluer avec le changement climatique** attendu entre 2010 et 2100.

3.2.2. Intensité du phénomène

Du fait des épisodes de sécheresse estivale supposés plus longs et plus intenses, la profondeur du sol affectée par la sécheresse pourrait être plus importante, ce qui serait de nature à amplifier l'intensité du phénomène en termes de sinistralité, voire, à des modifications plus durables de l'état du sol (par exemple une densification) dont les conséquences ne sont pas facilement prévisibles (EEA, 2008).

La seule méthode qui permettrait de connaître plus précisément l'évolution du front de dessiccation et ses conséquences sur l'amplitude des mouvements du sol serait de faire appel à la modélisation hydro-météorologique en prenant en compte le forçage météorologique et les processus physiques d'échanges énergétique et hydrique du sol avec l'atmosphère, puis d'en prédire les effets sur le bâti. Cette approche se révèle délicate à mettre en œuvre à l'échelle nationale pour au moins trois raisons :

- la modélisation hydro-météorologique est à l'épreuve, notamment à l'initiative de Météo-France et dans le cadre du projet de recherche ARGIC mais ne permet pas encore de modéliser en tout point la teneur en eau du sol de manière fiable ;
- si l'évolution des températures entre 2010 et 2100 est bien contrainte par les différents modèles, ce n'est pas le cas des précipitations pour lesquelles les modèles ne s'accordent pas forcément entre eux et semblent montrer une forte disparité nord-sud en France ;
- une fois les variations de teneur en eau évaluées, leur incidence éventuelle sur les mouvements de tassement et gonflement du sol sous une construction, et a *fortiori* l'impact de ces mouvements sur la stabilité de celle-ci, ne peuvent pas être aisément déterminés car ils dépendent des caractéristiques locales du sol et des conditions très spécifiques d'interaction sol-structure.

Aussi, la mise en œuvre d'une telle approche n'est pas envisageable dans le cadre de la présente étude.

Il sera donc considéré, par la suite, que le changement climatique ne modifie pas l'intensité du phénomène, ce qui permettra de s'appuyer sur la sinistralité observée pendant la période 1989-2003. De plus, les classes d'aléa définies dans le cadre de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement (paragraphe 2.2.4) seront supposées inchangées puisque reflétant pour l'essentiel les caractéristiques physiques des sols : les zones actuellement classées en aléa faible, moyen et fort resteront caractérisées de la même manière.

3.2.3. Fréquence des épisodes de « sécheresses géotechniques »

Toutes les données disponibles, notamment au travers des enquêtes effectuées à partir d'un échantillon de maisons sinistrées (Vincent *et al.*, 2006) ou à partir de l'étude de cas concrets (Bordes et Després, 2008), tendent à indiquer que la très grosse majorité des désordres constatés se produit au cours ou en fin de période estivale. Néanmoins, l'analyse des dates de survenance des sinistres survenus en France du fait du retrait-gonflement des sols argileux connaît de nombreuses lacunes, faute d'un système permettant un recensement systématique de ces données.

Comme mentionné dans le paragraphe 3.1, les sécheresses estivales, responsables en climat tempéré de la majorité des sinistres liés au retrait-gonflement, risquent de devenir plus fréquentes ce qui devrait conduire à une augmentation du nombre des années présentant une sinistralité importante.

De plus, dans l'hypothèse de sécheresses estivales plus fréquentes, l'effet cumulatif lié à la succession rapide d'épisodes de sécheresse, s'il existe, pourrait être amplifié, mais ce dernier point ne peut être pris en compte dans l'état actuel des connaissances.

Les hypothèses retenues pour estimer l'influence du changement climatique sur le phénomène concernent donc **l'évolution des fréquences d'occurrences des épisodes de « sécheresse géotechnique »** et seront détaillées dans le paragraphe suivant.

3.3. HYPOTHESES DE CHANGEMENT CLIMATIQUE RETENUES

Ainsi, pour les raisons évoquées ci-dessus, l'approche retenue consiste à tenter de déterminer l'évolution des périodes de retour des sécheresses qui ont marqué la période 1989-2003 au cours du 21^{ième} siècle. Faute de pouvoir prendre en compte l'ensemble des paramètres climatiques intervenant dans le phénomène de retrait-gonflement, il a été décidé d'essayer de déterminer la fréquence d'occurrence d'un épisode de type 2003 sur la base de la définition des épisodes caniculaires.

3.3.1. Relation température moyenne estivale et nombre de sinistres

Jusqu'à présent, un couplage entre température caniculaire et sécheresse géotechnique (1949, 1976, 1989-1990, 2003) a pu être constaté. L'illustration 9 présente le nombre de sinistres estimés à partir des chiffres de la CCR entre 1989 et 2003 en fonction de l'écart de la température moyenne journalière durant le trimestre d'été à la moyenne de ce paramètre.

Le paramètre « température » permet visiblement de bien distinguer un « bruit de fond » (années qui présentent un nombre moyen de sinistres de l'ordre de 22 000) de l'événement extraordinaire « de type 2003 » (environ 135 000 sinistres), même si ensuite il ne permet pas d'expliquer les différences (de 3500 à 44 100 sinistres) au sein même de l'ensemble des années « bruit de fond » et que cette analyse n'est fondée que sur une seule année.

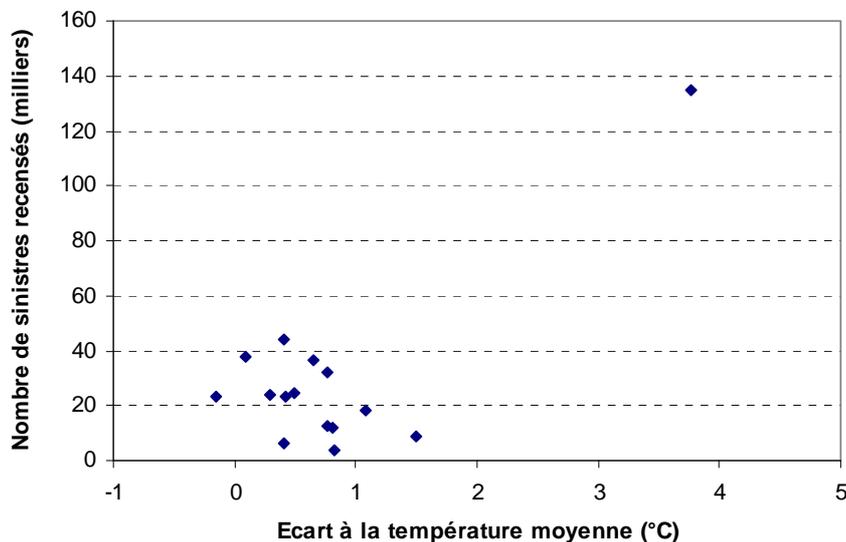


Illustration 9 - Dommages estimés par la CCR dans le cadre du régime CatNat en fonction de l'écart de la température à la température moyenne (Données : Météo-France et Caisse Centrale de Réassurance)

On peut alors définir l'ensemble des états possibles de la sinistralité comme ne comportant que deux éléments : il s'agit soit d'une année ordinaire, dite moyenne ou appartenant au bruit de fond, soit d'une année extraordinaire, de type 2003. Une seconde année caniculaire aurait permis de valider cette hypothèse (les données pour 2006 n'étant pas disponibles).

3.3.2. Evolution de la probabilité d'occurrence d'un événement de type 2003

Afin d'aider les groupes de travail à estimer les fréquences d'occurrence des canicules, la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC), Service du climat et de

l'efficacité énergétique (Sous direction climat et qualité de l'air), a proposé une méthode générale commune de dénombrement des canicules ou de leur fréquence basée sur **une modélisation simplifiée à partir d'une seule résolution d'Arpège** étant donné les limites identifiées des méthodologies utilisées jusqu'alors (Illustration 10).

Principe	Limites
Modélisation des fréquences des canicules futures sur la base de la tendance de la hausse des températures du trimestre d'été	<ul style="list-style-type: none"> Le lien entre moyennes des températures trimestrielles estivales et augmentation de la fréquence des canicules n'est pas avéré. La méthode est donc contestable.
Dénombrement des canicules sur la base des modélisations d'Arpège	<ul style="list-style-type: none"> Une seule résolution d'Arpège est à notre disposition ce qui rend trop incertain l'exploitation des données pour les horizons de moyen terme (avant 2050) ; Effet de seuil annuel fort et pas de données en fréquence.

Illustration 10 – Rappel des limites identifiées des méthodologies utilisées jusqu'alors (source : DGECC)

La modélisation proposée prévoit, dans un premier temps, de dénombrer, à partir de la résolution d'Arpège, les événements de type caniculaire 2003 pour les scénarios A2 et B2. Pour palier au manque de définition standardisée de la canicule, un critère fondé sur une restriction de l'indice Stardex⁶, incluant la canicule 2003, a été retenu : **l'occurrence d'une canicule est considérée pour des périodes de retour de 12 jours continus où les températures ont excédé d'au moins 5 °C la moyenne**⁷. Le comptage de ces canicules est présenté sur l'illustration 11.

	2011-2030	2021-2040	2031-2050	2041-2060	2051-2070	2061-2080	2071-2090	2081-2100
A2	0	0	2	2	4	7	10	24
B2	0	1	2	1	4	8	7	6

Illustration 11 – Comptages des « canicules » sur Arpège par intervalle de vingt ans

N.B. : il peut y avoir plusieurs épisodes pour une même année, ce qui explique le chiffre de 24 épisodes en 20 ans.

⁶ Une forte chaleur selon Stardex correspond à 5 jours consécutifs dépassant d'au moins 5°C la moyenne.

⁷ Le critère utilisé pour les canicules très extrêmes (11 jours continus avec 8°C au dessus de la moyenne) ne prévoyant quasiment aucune canicule sur le siècle dans certains cas, il est jugé comme probablement trop restrictif.

Ensuite, à partir de ce comptage, deux types de régressions ont été effectuées (Illustration 12), en partant du principe que l'incertitude sur les résultats d'Arpège est plus faible du fait du nombre plus important d'épisodes de canicule :

- une régression linéaire entre la fréquence moyenne actuelle de canicule et celle calculée sur la période 2071-2100, simplificatrice mais présentant l'avantage de se baser sur les données d'incertitude minimale (en fin de siècle) ;
- une régression non linéaire entre les fréquences sur 20 ans à trois horizons de fins de siècle (2070, 2080 et 2090) et la fréquence moyenne actuelle, permettant d'avoir une courbe de croissance plus progressive mais s'appuyant sur des moyennes sur 20 ans, plus incertaines que celle sur 30 ans.

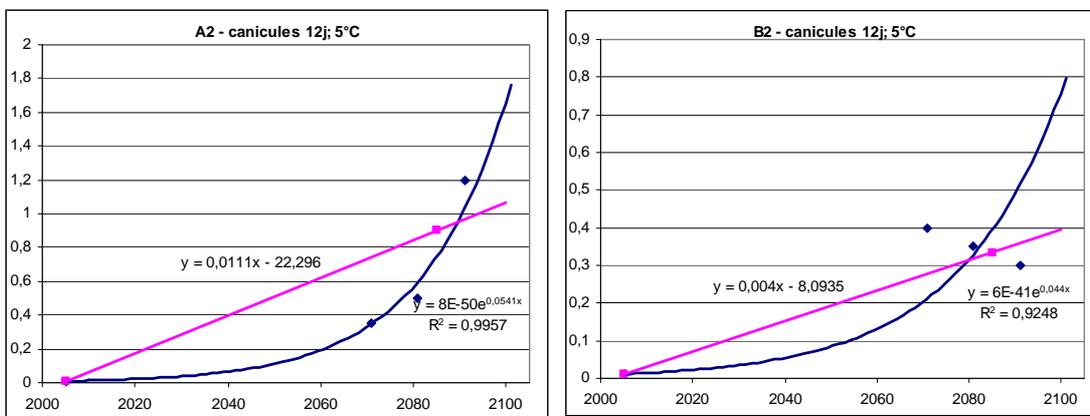


Illustration 12 – Ajustement des courbes de régression sur les données issues du modèle Arpège

L'illustration 12 montre que les deux méthodes donnent des résultats assez différents, particulièrement marquées dans la zone de plus forte incertitude du modèle Arpège utilisé (i.e. ante 2070), notamment pour le scénario A2. De plus, même en fin de siècle, les moyennes calculées donnent dans certains cas des résultats peu intuitifs (diminution de la fréquence de canicules modélisées dans le scénario B2).

Le graphique ne semblant pas en mesure de discriminer la meilleure approche pour la zone d'incertitude, on propose de tester les valeurs modélisées du nombre de canicule et de les comparer au comptage Arpège. Pour ce faire on transforme la fonction précédente fréquence = f(date) en une fonction fréquence = f(durée). La répartition par horizon montre que le modèle exponentiel donne des résultats quasiment identiques à ceux du comptage Arpège pour les horizons rapprochés. En revanche, le modèle linéaire a tendance à modéliser plus d'occurrences de canicules aux horizons rapprochés (sauf pour B2). Au vu de ces résultats, le Groupe Méthodologie propose de retenir les **deux types de régression à partir des comptages Arpège comme bornes** (notée min et max dans la suite du rapport) pour la modélisation des fréquences et du nombre de canicule aux horizons 2030, 2050 et 2100. Sous cette hypothèse, les quantifications suivantes ont été obtenues (Illustration 13).

Scénario	2030	2050	2100
A2	[0 - 3]	[2 - 11]	[32 - 51]
B2	[0 - 1]	[1 - 4]	[18 - 25]

Illustration 13 - Bornage du nombre de canicule aux différents horizons

Scénario	2030	2050	2100
A2	[0.04 - 0.29]	[0.12 - 0.51]	[1.06 - 1.76]
B2	[0.03 - 0.11]	[0.08 - 0.19]	[0.77 - 0.39]

Illustration 14 - Bornage des fréquences de canicule aux différents horizons

Il peut y avoir plusieurs épisodes pour une même année, ce qui explique la fréquence supérieure à 1 à l'horizon 2100. Lorsque c'est le cas, il sera considéré une fréquence de 1.

3.3.3. Limites et incertitudes liées à cette approche

Cette approche est loin d'être idéale et présente un certain nombre de limites et d'incertitudes qu'il est nécessaire de rappeler ici.

Tout d'abord, le nombre et les fréquences de canicules proposées dans cette partie restent des modélisations à partir d'un seul modèle dans une situation d'incertitude importante.

L'hypothèse de considérer **la France comme un casier géographique homogène vis-à-vis du changement climatique est certainement très réductrice**. Même si l'effet des vagues de chaleur se fait sentir à une échelle bien plus large que le simple département ou même la région, il est envisageable que deux vagues de chaleur avec un même écart de température à la moyenne nationale ne produisent pas les mêmes effets en termes de dommages si elles ne sont pas centrées aux mêmes endroits.

Ensuite, cette hypothèse **néglige les éventuels effets cumulatifs de sécheresses successives rapprochées qui pourraient se traduire par une intensification du phénomène**. En effet, cette modélisation prévoit qu'un épisode de type 2003 se produira à l'horizon 2100 tous les ans, pour le scénario A2, et tous les deux/trois ans pour le scénario B2.

Par ailleurs, **le lien entre la température et la sinistralité est certainement positif, mais il ne peut expliquer à lui seul et de manière stricte les dommages**. Ainsi, deux années caractérisées par des températures moyennes estivales très proches peuvent présenter des différences significatives de sinistralité en raison des autres paramètres à prendre en compte, dont la pluviométrie mais aussi nombre de facteurs qui influent, souvent de manière très locale sur les variations d'humidité du sol.

Enfin, l'hypothèse retenue (fondée sur un ensemble des états pourvu de seulement deux dimensions) tient bien évidemment à l'accumulation des approximations recensées préalablement. Il est évident que la réalité est bien plus complexe, mais **le manque de statistiques précises sur le passé ne permet pas d'imaginer, pour l'instant, un modèle beaucoup plus élaboré que celui-ci**.

3.3.4. Synthèse

La démarche retenue est fondée sur l'évolution de la fréquence d'occurrence d'un épisode canicule type 2003 où seule la température est prise en compte car les statistiques sur les précipitations, autre facteur important dans le retrait-gonflement des argiles, même si elles étaient connues avec précision, ne permettent pas, pour l'instant, de pouvoir étudier l'influence du changement climatique sur le retrait-gonflement en utilisant une approche déterministe.

Finalement, dans la suite de cette étude, chaque année étudiée présentera une probabilité d'occurrence d'un épisode de type 2003 et une probabilité d'occurrence complémentaire d'une année dite « bruit de fond » pour laquelle la sinistralité est moindre mais non négligeable. De plus, on négligera les éventuels effets cumulatifs de sécheresse et aucune intensification du phénomène ne sera considérée. Enfin, l'extension géographique du phénomène sera jugée constante et s'appuiera sur les zones définies par la carte d'aléa provisoire à l'échelle nationale.

A part la fréquence d'occurrence de l'année type 2003, aucune amplification du phénomène n'est envisagée ; c'est-à-dire que, pour chaque année considérée, les dommages seront égaux à une somme pondérée de ceux des années « bruit de fond » et de l'année de type 2003, la somme pondérée étant liée à la probabilité d'occurrence d'une année de type 2003.

4. Evaluation de l'impact et du coût du changement climatique sur le retrait-gonflement des argiles

Deux évaluations de l'impact du changement climatique ont été réalisées, l'une à l'échelle nationale calquée sur la méthode mise en œuvre dans l'annexe technique du rapport « Financial Risk of Climate Change » commandé par l'Association des Assureurs Britanniques (ABI) et, l'autre, à l'échelle départementale qui s'appuie sur des données supplémentaires que sont les cartes d'aléa retrait-gonflement à l'échelle départementales et la répartition des maisons individuelles. Les scénarios climatiques pris en compte dans cette partie sont ceux décrits au paragraphe 3.3.2. A chaque fois, quatre calculs seront effectués, à partir des **scénarios A2 et B2 avec des lois linéaires ou exponentielles** (notés A2 min, A2 max, B2 min et B2 max en fonction des résultats obtenus).

Afin de ne pas négliger l'accroissement de la population française et, plus particulièrement, l'accroissement du nombre de maisons individuelles, évaluée à 200 500 logements supplémentaires par an à l'échelle nationale (<http://www.insee.fr>), il a été décidé de réaliser quelques simulations en prenant en compte l'évolution prévisible du nombre de maisons individuelles, et ce malgré le cadre commun des différents groupes de travail. Ces dernières se limiteront à l'horizon 2030 contrairement aux estimations à enjeux constants qui seront réalisées aux trois horizons suivants : 2030, 2050 et 2100.

4.1. EVALUATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'ECHELLE NATIONALE

4.1.1. Objectifs

Le but de cette évaluation est d'estimer les conséquences financières possibles des modifications de l'aléa « retrait-gonflement des argiles » dus au changement climatique en France. L'approche développée ici est basée sur celle développée dans les annexes techniques du rapport « Financial Risk of Climate Change » commandé par l'Association des Assureurs Britanniques (ABI) en 2005⁸. La méthodologie développée consiste à considérer le pays comme une entité géographique homogène qui va réagir à des modifications sur les paramètres d'entrée du système.

⁸ Pour des précisions « en version originale », on pourra se reporter aux pages 69 à 72 des annexes techniques disponibles à la référence suivante : http://www.abi.org.uk/Display/File/Child/552/Technical_Annexes_climatetechnical.pdf

4.1.2. Données

Les données économiques disponibles pour effectuer cette évaluation sont issues des informations fournies par la CCR et du rapport Boutin (2007) et sont les suivantes:

- le coût moyen d'un sinistre affectant une maison individuelle (quelle que soit sa localisation) est estimé à 10 200 euros (valeur calculée pour l'année 2003 par la CCR dans le cadre du régime CatNat), auquel s'ajoute une franchise de 1 500 euros à la charge du propriétaire ;
- l'ensemble des sinistres sur une année « bruit de fond » sera ainsi estimé à une charge financière nationale de 222,42 millions d'euros, et les années correspondant à des canicules exceptionnelles de l'envergure de 2003 ou supérieures, seront évaluées à 1 343,73 millions d'euros de dommages, soit environ 6 fois plus qu'une année ordinaire. Ces chiffres sont sensiblement supérieurs à ceux fournis par la CCR et le rapport Boutin (2007) car ils ont été recalculés sur le nombre de maisons individuelles existantes en 2010, date de début des estimations.

Ces données sont récapitulées dans le tableau de l'illustration 15.

Sinistre moyen (en euros)	Franchise (en euros)	Coût d'une année « bruit de fond » (en millions d'euros)	Coût d'un épisode type 2003 (en millions d'euros)
10 200	1 500	222,42	1343,73

Illustration 15 - Récapitulatif des données économiques

Les données démographiques : le sous-groupe de travail a choisi de considérer que l'évolution du parc immobilier français des logements individuels suivra une progression linéaire de 0,925 % par an entre 2010 et 2030, taux déterminé à partir de la progression du nombre de logements individuels entre 1990 et 1999 à l'échelle nationale et extrait de la base des données issues du site de l'INSEE⁹.

Au-delà de 2030 et en l'absence de prospective sur l'évolution des logements particuliers, il est décidé d'évaluer les coûts sur la base d'un parc constant actuel (estimé pour l'année 2010).

4.1.3. Méthodologie

La méthodologie mise en œuvre dans l'étude à l'échelle nationale est présentée sur l'illustration 16.

⁹ <http://www.insee.fr/fr/default.asp>, consulté au 16/09/08

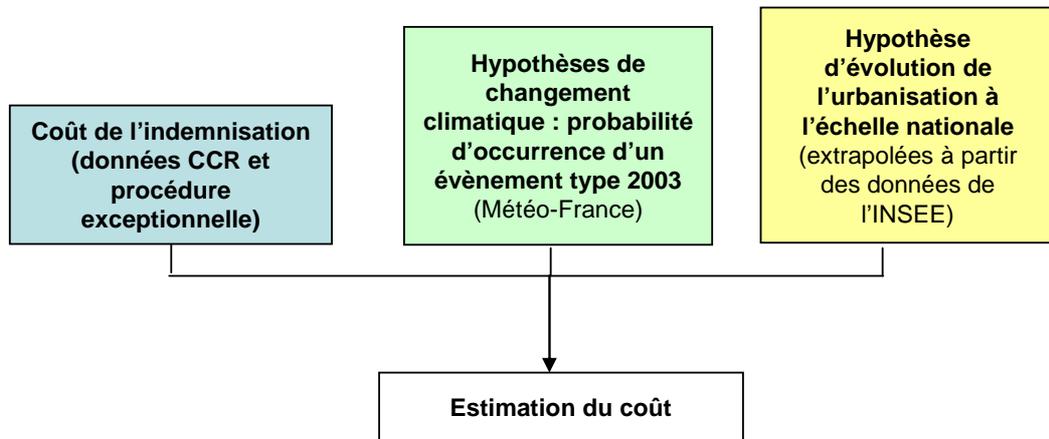


Illustration 16 - Méthodologie appliquée dans le cadre de l'étude nationale du groupe de travail Sécheresse du RNACC

Le calcul des dommages va s'effectuer suivant plusieurs échéances et conditions, mais toujours suivant le même processus, à savoir que les dommages sur les maisons individuelles estimés à l'année n seront le résultat du calcul de l'espérance des dommages à cette année. La formule littérale est donc :

$$\text{Dommage à l'année } n = \text{probabilité d'un événement 2003} * \text{dommage d'un événement 2003} + \text{probabilité de l'année ordinaire} * \text{dommage de l'année ordinaire}$$

Les calculs vont être menés suivant différents jeux de conditions :

- 1) D'abord, en calculant, d'une part, quels seront, en moyenne, le coût des dommages causés chaque année pour les périodes 2020-2040, 2040-2060 et 2080-2100, sans prise en compte de l'accroissement du parc immobilier pour les 2 dernières périodes.
- 2) Ensuite en calculant le coût des dommages cumulés sur la période 2010-2030 en injectant une croissance annuelle du nombre de maisons individuelles telle qu'annoncée dans la partie « données ».

4.1.4. Résultats : première estimation des coûts induits et étude paramétrique

Evaluation des coûts aux horizons 2030, 2050 et 2090 sans évolution de l'urbanisation

Le tableau suivant donne les résultats des calculs effectués suivant les explications précédant cette partie selon les deux bornes (min et max) des scénarios A2 et B2 (cf. paragraphe 3.3.2).

Période	1989-2003	2020-2040	2040-2060	2080-2100
A2 min	222,4	266,9	353,7	1343,7
A2 max		488,2	737,1	1235
B2 min		264	322,7	805,3
B2 max		344,8	435,5	616,8

Illustration 17 – Coût annuel moyen estimés des dommages par période, sans urbanisation supplémentaire (étude à l'échelle nationale)

D'après cette méthode, à enjeux constants, les coûts moyens annuels devraient augmenter de 20 à 220 % à l'horizon 2030, 45 à 330 % à l'horizon 2050 et être multipliés par 3 à 6 fois d'ici la fin du siècle selon l'hypothèse de changement climatique retenue.

Evaluation des coûts induits par le changement climatique à l'horizon 2030 en prenant en compte l'évolution de l'urbanisation

On décide ensuite de prendre en compte sur la période 2010-2030 une évolution de l'urbanisation, certes faible, mais permettant de simuler les dommages imputables aux constructions futures. On fait donc ici l'hypothèse que le nombre de maisons individuelles sis en zone à risque croît à une vitesse comparable à celle du parc national, c'est-à-dire de 0,925 % par an. Les illustrations 18 et 19 présentent les coûts cumulés sur la période 2010-2030 avec et sans évolution de l'urbanisation.

Taux de croissance du parc	0%			0,925 % par an	
	Sans CC	A2 min	A2 max	A2 min	A2 max
Scénario					
Domage total sur 2010-2030 (millions d'euros)	4 906,40	5 244,6	7637,9	6154,8	9049,2

Illustration 18 - Les effets de l'urbanisation pour le scénario climatique A2 sur les coûts cumulés pour la période 2010-2030 (étude à l'échelle nationale)

Taux de croissance du parc	0%			0,925 % par an	
	Sans CC	B2 min	B2 max	B2 min	B2 max
Scénario					
Domage total sur 2010-2030 (millions d'euros)	4 906,40	5253,7 ¹⁰	6 289,0	6163,4	7403,8

Illustration 19 - Les effets de l'urbanisation pour le scénario climatique B2 sur les coûts cumulés pour la période 2010-2030 (étude à l'échelle nationale)

¹⁰ Il est à remarquer que ces résultats peuvent sembler surprenants à première vue car le scénario A2 fournit des coûts inférieurs à ceux de B2 à l'horizon 2030 pour la loi exponentielle. Pourtant, ils sont à mettre en relation avec les résultats du modèle Arpège (paragraphe 3.3.2)

Ces illustrations ont permis de mettre en évidence qu'une augmentation d'environ 17,5 % des coûts des dommages est à attendre sur la période 2010-2030 pour une croissance annuelle du nombre de maisons individuelles de 0,925 %. Cette augmentation conduit à des surcoûts de l'ordre d'un milliard supplémentaire sur ces vingt années, soit le coût d'un événement 2003 de plus. Ainsi, **la prise en compte de la croissance du parc immobilier ne peut être négligée dans une telle étude.**

4.1.5. Conclusion

Cette partie a permis de montrer que le changement climatique devrait pousser d'ici la fin du siècle à une multiplication par trois ou six des coûts moyens annuels des dommages imputables au phénomène de retrait-gonflement des argiles, toutes choses étant égales par ailleurs.

La prise en compte de l'évolution du nombre de maisons individuelles est nécessaire dans une telle étude, d'autant plus que d'éventuelles mesures d'adaptation peuvent être prises pour ce type de constructions.

4.2. EVALUATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'ECHELLE DEPARTEMENTALE

4.2.1. Objectifs

L'étude départementale a pour objectifs de prendre en compte l'évolution de l'urbanisation jusqu'en 2030, la localisation des enjeux ainsi que la sinistralité rencontrée à l'échelle départementale afin de bénéficier d'une estimation plus précise des coûts et de hiérarchiser les secteurs à risques.

4.2.2. Données

La **susceptibilité au retrait-gonflement** a été déterminée à partir de la carte d'aléa retrait-gonflement provisoire (paragraphe 2.2.4).

Le **nombre de sinistres et leur localisation** à l'échelle départementale ont été appréhendés à partir de deux sources complémentaires de données comme explicité précédemment (paragraphe 2.1.3). Les coûts des indemnités ont permis de quantifier le nombre de sinistres et les sinistres recensés par le BRGM de déterminer leur répartition sur les zones d'aléa.

Le **nombre de maisons individuelles** par zones d'aléa et par département a été évalué par le SOeS (paragraphe 2.3.4).

L'évolution par département du nombre de maisons individuelles est issue des données fournies par le site de l'INSEE à l'échelle départementale entre 1990 et 1999 (figurant en annexe 5).

4.2.3. Méthodologie générale

Dans cette partie, l'ensemble des calculs est réalisé **département par département**. Le calcul se décompose selon les deux étapes suivantes :

- une première étape consiste à calculer le **pourcentage de maisons individuelles sinistrées** dans chaque zone d'aléa (faible, moyen et fort) des départements pour une année type 2003 et pour une année « bruit de fond » ;
- dans une deuxième étape, la prise en compte des hypothèses de changement climatique et de l'évolution de l'urbanisation permet de calculer le nombre de sinistres attendus puis d'estimer le coût prévisible.

4.2.4. Calcul des proportions de maisons individuelles sinistrées

Méthodologie

Pour ce calcul, deux cas de figure doivent être distingués selon la disponibilité des données. Pour cette partie, le détail du calcul figure en annexe 3.

Pour chaque département pour lesquels la cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux a déjà été réalisée par le BRGM, il est possible de déterminer la répartition par département du nombre de sinistres survenus dans chaque zone d'aléa (faible, moyen et fort). Cette répartition est déterminée par croisement entre le nombre de sinistres (paragraphe 2.1.4.a), leur localisation géographique (paragraphe 2.1.4.b) et les cartes d'aléa retrait-gonflement établies par le BRGM (paragraphe 2.2.4). Sur la base des résultats obtenus pour tous ces départements pour chaque zone d'aléa, il est également calculé, à l'échelle nationale, deux taux moyens, T_{1-2} et T_{1-3} , de progression entre les proportions de maisons individuelles sinistrées entre les zones d'aléa faible, moyen et fort.

Pour les départements pour lesquels les données de sinistres n'ont pas encore été collectées par le BRGM (cartographie d'aléa retrait-gonflement non disponible), la répartition des sinistres selon les zones d'aléa n'est a priori pas connue. Celle-ci a été déterminée à partir des deux taux moyens, T_{1-2} et T_{1-3} , calculés précédemment, du nombre de sinistre sur le département évalué à partir des données d'indemnisation et du nombre de maisons individuelles sur chaque zone d'aléa.

Résultats

Les proportions annuelles départementales de maisons individuelles sinistrées pour l'épisode 2003 et la période 1989-2002 (années « bruit de fond ») figurent en annexe 4 et sont représentées sur les illustrations 20 et 21 pour la France métropolitaine. Ces chiffres départementaux sont utilisés dans la suite du calcul. Ainsi, pour exemple, pour l'épisode 2003, le pourcentage de maisons individuelles sinistrées en aléa fort varie entre 0 et 17 % (cette valeur maximale étant obtenue pour les Alpes-de-Haute-Provence). En aléa moyen, il est compris entre 0 et 12 % et en aléa faible, entre 0 et 3,7 %. Celui-ci est considéré comme nul dans toutes les zones d'aléa nul.

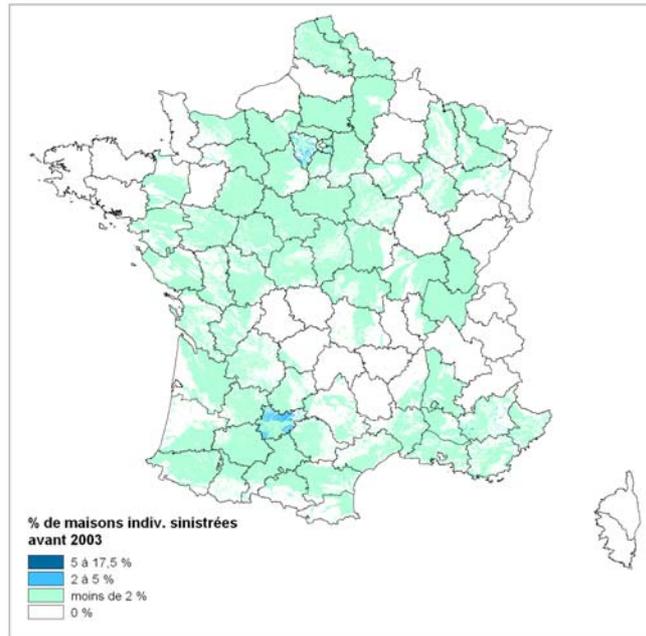


Illustration 20 – Répartition de la proportion annuelle de maisons individuelles sinistrées avant 2003 sur les zones présentant une susceptibilité non nulle à l'aléa retrait-gonflement

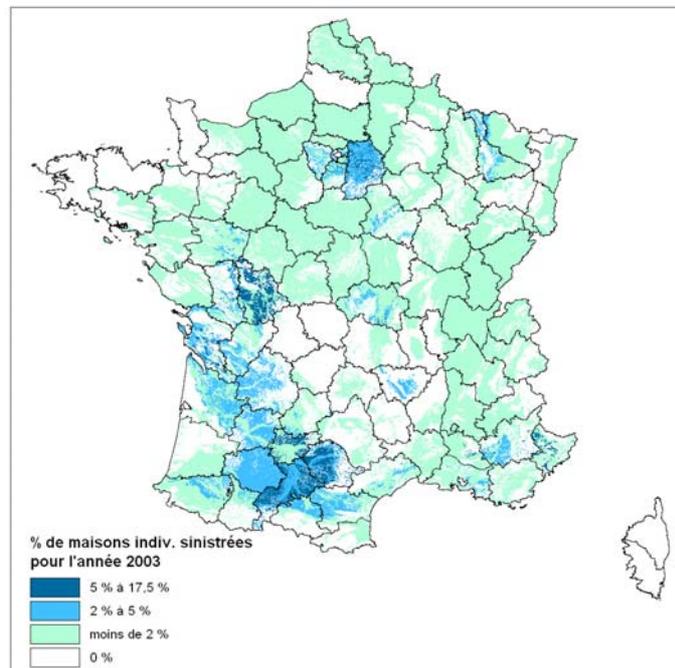


Illustration 21 - Répartition de la proportion de maisons individuelles sinistrées en 2003

En agrégeant ces chiffres à l'échelle nationale, le nombre de maisons individuelles sinistrées obtenu s'élève en moyenne à 0,5 % dans les zones d'aléa faible, à 2,14 %

dans les zones d'aléa moyen et 3,66 % dans les zones d'aléa fort pour une année type 2003.

4.2.5. Impact du changement climatique sur les maisons individuelles avec évolution de l'urbanisation à l'horizon 2030 et évaluation des coûts

Une fois la proportion de maisons individuelles sinistrées estimée pour l'ensemble des départements métropolitains, l'objectif est de calculer **pour chaque zone d'aléa de chaque département** le nombre de sinistres cumulés attendus entre 2010 et 2030 puis d'évaluer le coût prévisible occasionné par ces dommages. La méthodologie mise en œuvre pour le calcul départemental est résumée sur l'illustration 22.

Méthodologie et hypothèses de calcul

Pour cela, pour chaque zone d'aléa de chaque département et pour chaque année (entre 2010 et 2030), sont calculés :

- le nombre de constructions attendues de maisons individuelles estimé par département en considérant une évolution linéaire de l'urbanisation des maisons individuelles entre 2010 et 2030 sans distinction pour les différentes zones d'aléa (à partir du taux annuel, cf. annexe 5)
- le nombre de sinistres attendus en prenant en compte les pourcentages de maisons individuelles sinistrées pour les années dites « bruit de fond » et les années de type 2003 (Illustration 20 et Illustration 21) et les différentes hypothèses de changement climatique décrites dans le paragraphe 3.3. ;
- le nombre de sinistres attendus entre 2010 et 2030 résulte de la somme des sinistres pour chaque exercice entre 2010 et 2030.

Comme pour l'échelle nationale (paragraphe 4.1), le coût est calculé à partir d'un coût moyen de sinistre de 10 200 € auquel s'ajoute la franchise, d'une valeur de 1 500 €.

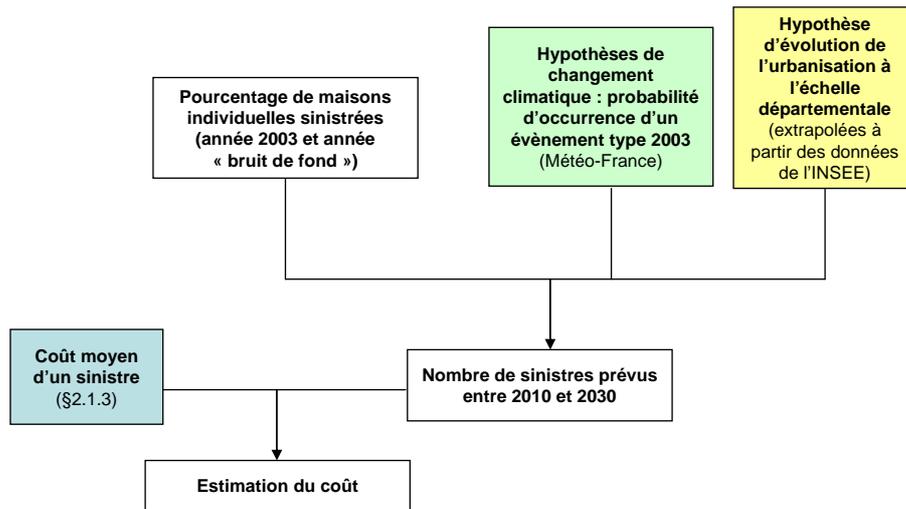


Illustration 22 – Schéma de principe de la méthodologie appliquée dans le cadre de l'étude départementale du groupe de travail Sécheresse du RNACC

Résultat

a. Sans évolution de l'urbanisation

Les coûts agrégés à l'échelle nationale sans évolution de l'urbanisation sont exactement identiques à ceux déterminés à l'échelle nationale et ne sont donc pas présentés dans cette partie.

En revanche, la méthode départementale permet de distinguer ce qui se passe département par département. Ainsi, du fait du changement climatique, sur la période 2010-2030, la Charente Maritime devrait voir son nombre de sinistres (et donc son coût) multiplié par un facteur compris entre 1,3 et 4 selon l'hypothèse de changement climatique considérée et certains départements de l'est (Côte d'Or, Saône-et-Loire), par un facteur compris entre 2 et 12. Au contraire, pour d'autres départements comme le Nord, le changement climatique ne semble pas avoir une importance déterminante. Il est à noter que les départements qui ressortent ici sont ceux qui ont une importante différence entre les proportions de maisons individuelles sinistrées pour les années bruit de fond et les années de type 2003. Ensuite, le changement climatique aura une incidence d'autant plus importante que la proportion de maisons individuelles sinistrées et que la différence entre les années bruit de fond et caniculaire de type 2003 sont fortes. Ainsi, l'aléa fort en Charente-Maritime pourrait connaître une augmentation du nombre de sinistre comprise entre 34 et 280 % selon l'hypothèse de changement climatique considérée (conduisant, dans le cas le plus défavorable à un nombre de sinistre de près de 4 000 au lieu des 1 020 qui seraient susceptibles de se produire en l'absence de changement climatique).

Toutefois, le principal intérêt de la méthodologie est de prendre en compte l'évolution différentielle de la croissance de l'urbanisation.

b. Avec évolution de l'urbanisation

Les illustrations 23 et 24 présentent les nombres de sinistres et les coûts pour les deux scénarios A2 et B2 calculés par la méthode départementale mais agrégés à l'échelle nationale. Il est à noter que le calcul réalisé à l'échelle départementale fournit des coûts plus importants (de l'ordre de 10%) que celui réalisé à l'échelle nationale, ce qui peut être dû à la prise en compte de la répartition inhomogène des nouvelles constructions (par exemple forte croissance du nombre de maisons individuelles dans des zones où la sensibilité au retrait-gonflement est plus importante).

Taux de croissance du parc	Résultat départemental avec un taux variable selon les départements (%) (cf. annexe 5)			Résultat sans évolution de l'urbanisation (pour rappel)			
	Scénario	Sans changement climatique	A2 min	A2 max	Sans changement climatique	A2 min	A2 max
Nombre de sinistres		476 212	570 301	831 719	-	-	-
Coût des dommages total sur 2010-2030 (millions d'euros)		6241,5	6672,5	9731,1	4906,4	5 244,50	7 637,90

Illustration 23 - Les effets de l'urbanisation sur 2010-2030 (étude à l'échelle départementale) pour le scénario climatique A2

Taux de croissance du parc	Résultat départemental avec un taux variable selon les départements (%) (cf. annexe 5)			Résultat sans évolution de l'urbanisation (pour rappel)			
	Scénario	Sans changement climatique	B2 min	B2 max	Sans changement climatique	B2 min	B2 max
Nombre de sinistres		476 212	570 997	682 611	-	-	-
Coût des dommages total sur 2010-2030 (millions d'euros)		6241,5	6680,7	7986,5	4 906	5 253,70	6 289,10

Illustration 24 - Les effets de l'urbanisation sur 2010-2030 (étude à l'échelle départementale) pour le scénario climatique B2

De plus, la prise en compte de l'évolution de l'urbanisation conduit à une nouvelle hiérarchisation des départements les plus touchés en termes de nombre de sinistres et du coût associés. Ainsi, la Charente-Maritime pourrait passer de la 29^{ème} à la 16^{ème} place des départements les plus touchés avec 14 800 nouveaux sinistres sur la période 2010-2030, et la Gironde de la 14^{ème} à la 9^{ème} place (avec environ 25 100 nouveaux sinistres) dans l'hypothèse la plus défavorable pour cet horizon (A2 linéaire). Certains départements verraient alors leur coût cumulé des dommages être multipliés par 4 ou 5 et plus exceptionnellement par 10, comme la Haute-Loire ou la Loire sur la période 2010-2030. Toutefois, ce résultat devra être révisé en intégrant une régionalisation des scénarios de changement climatique.

4.2.6. Conclusions

Outre les conclusions déjà formulées dans le paragraphe 4.1, cette partie a montré que le changement climatique pourrait induire une augmentation du coût des dommages sur la période 2010-2030 de l'ordre de 7 à 55 % pour le scénario A2 et de l'ordre de 7 à 30 % pour le scénario B2.

L'évolution prévisible du nombre de maisons individuelles exposées au phénomène (extrapolée à partir des taux d'accroissement observés ces dernières années) intervient pour une part non négligeable dans l'accroissement prévisible de la sinistralité, puisqu'elle se traduit par une augmentation de l'ordre de 27 % avec les différents scénarios de changement climatique à l'horizon 2030, sauf à adopter rapidement des mesures constructives adéquates. En considérant une évolution de l'urbanisation différenciée selon les départements (par extrapolation des taux de croissance démographiques sur la période 1989-99), le changement climatique pourrait ainsi induire une augmentation des coûts cumulés sur la période 2010-2030 nettement plus significative : entre 36 et 98 % avec le scénario A2 et entre 36 et 66 % dans le cas du scénario B2 par rapport au cas sans changement climatique et à enjeux constants. Cela montre à la fois l'importance de prendre en compte l'évolution des enjeux dans une telle étude et l'importance des politiques d'adaptation des constructions.

Du fait du changement climatique, dans l'hypothèse d'une augmentation du nombre de maisons individuelles exposées, certains départements pourraient voir leurs coûts cumulés des dommages sur la période 2010-2030 être multipliés par 10 mais plus couramment par 4 ou 5 (dans l'hypothèse de changement climatique la plus défavorable). Cette conclusion devra être confirmée par l'intégration de scénarios régionalisés de changement climatique.

4.3. LIMITES ET INCERTITUDES DES EVALUATIONS

Si l'approche à l'échelle nationale présente l'avantage d'être une méthode globalisante, utilisant des données d'entrées moyennes consolidées à grande échelle (la France), elle ne permet pas d'avoir une idée de la répartition des coûts par département. Ces deux approches sont donc complémentaires. Toutefois, de nombreuses limites et incertitudes relatives à cette partie méritent d'être soulignées.

En effet, outre l'approche retenue et les hypothèses considérées pour le changement climatique chaque étape du calcul présente son lot d'incertitudes.

Concernant les deux échelles, d'une part, le coût d'indemnisation peut ne pas refléter complètement les coûts réels supportés par la collectivité et les particuliers (ces coûts ne prennent pas en compte par exemple les sinistres qui se sont produits hors commune CatNat et non indemnisés, ni les coûts relatifs à la garantie décennale) et, d'autre part, le taux de croissance des enjeux a été considéré sur la période 1990-1999 qui a été une période de faible de croissance.

A l'échelle départementale, les limites suivantes peuvent être formulées :

- la première incertitude réside dans les cartes d'aléa retrait-gonflement elles-mêmes, qui présentent, lorsqu'elles sont réalisées dans le cadre de la cartographie nationale, une échelle de validité qui est le 1/50 000, mais celle-ci est le 1/1 000 000 dans les zones qui ont été couvertes dans le cadre de la présente étude à partir de la carte géologique nationale de la France ;
- concernant le nombre de sinistres calculé, celui-ci est difficile à évaluer précisément, faute d'une base de données fiable et exhaustive des sinistres déjà survenus et indemnisés depuis 1989 et du fait des doutes qui pèsent sur la signification des coûts moyens de sinistres fournis par la CCR ;
- concernant le calcul du nombre de maisons individuelles, celui-ci n'est qu'une estimation mais qui ne doit pas être trop entaché d'erreur à l'échelle du département ;
- en revanche, il est peu probable que la croissance du nombre de maisons individuelles se fasse de manière homogène à l'échelle départementale comme cela a été considéré : le taux d'évolution de l'urbanisation dépend de nombreux facteurs qui n'ont pu être pris en compte dans le cadre de la présente étude et ceux-ci sont donc à considérer avec extrême prudence ;
- cette étude pourrait être complétée par une prise en compte sectorisée des changements climatiques.

5. Mesures d'adaptation envisagées, analyse des coûts

Après un bref rappel des mesures préventives actuellement préconisées pour limiter la vulnérabilité des maisons individuelles en construction vis-à-vis du risque lié au retrait-gonflement des sols argileux, le présent chapitre présente différentes solutions techniques d'adaptation des modes de fondation, discutées au sein du groupe de travail, et en compare les coûts et conditions de mise en œuvre. Puis est proposée une analyse du coût de la mise en œuvre de telles mesures de prévention en regard des économies attendues du fait d'une baisse de la sinistralité ainsi qu'un examen des stratégies envisageables afin d'éviter que les effets attendus du changement climatique ne se traduisent par une augmentation excessive de la sinistralité du fait du retrait-gonflement des sols argileux.

5.1. RAPPEL DES MESURES PREVENTIVES PRECONISEES

Les mesures préventives actuellement préconisées pour la construction de maisons individuelles sur terrains potentiellement sujets au phénomène de retrait-gonflement consistent à réaliser une étude géotechnique préalable pour caractériser le plus finement possible la nature du sol d'assise, évaluer son potentiel de tassement et gonflement sous l'effet de variations hydriques et identifier ses hétérogénéités éventuelles ainsi que les éléments de l'environnement proche, susceptibles de provoquer des modifications saisonnières de la teneur en eau locale. A défaut d'une telle étude préalable, qui permet au géotechnicien de proposer au cas par cas les mesures d'adaptations nécessaires du projet de construction, un certain nombre de conseils pratiques ont été formulés (Philipponnat, 1978) et largement diffusés notamment par l'Agence Qualité Construction et le MEEDDAT, portant notamment sur la réalisation des fondations, la rigidification de la structure et la maîtrise des variations hydriques dans le massif de sol où sont ancrées les fondations.

Dans le cadre des Plans de prévention des risques naturels (PPRn) spécifiques au retrait-gonflement des sols argileux, qui sont d'ores et déjà adoptés dans plus de 550 communes en France, le règlement élaboré à l'initiative du MEEDDAT et qui a fait l'objet d'une reformulation dans le cadre d'un groupe de travail en 2007, rend obligatoire le recours à une étude géotechnique préalable en zone réglementée afin d'adapter au mieux le projet de construction à la nature du sol. Toutefois, pour les projets de maisons individuelles (hors permis groupés), une alternative est proposée qui consiste à adopter une série de mesures constructives forfaitaires (Illustration 25) qui concernent principalement les fondations (qui doivent être armées, bétonnées à pleine fouille, et ancrées de manière homogène à une profondeur minimale comprise entre 0,80 et 1,20 m selon le niveau d'aléa identifié), la structure (avec chaînages et joints de rupture obligatoires) et la maîtrise des eaux dans le sol (mise en place d'un système périphérique anti-évaporation, éloignement des rejets d'eaux pluviales et usées, des drains, des puits et des arbres, etc.). Le surcoût occasionné par le respect

de ces prescriptions demande à être actualisé mais il avait été évalué dans le cadre d'une étude menée à la demande du ministère (Exbrayat, 2001) à **environ 5 à 8 % du coût de la construction d'une maison individuelle**, l'élément le plus coûteux étant le dispositif périphérique anti-évaporation.

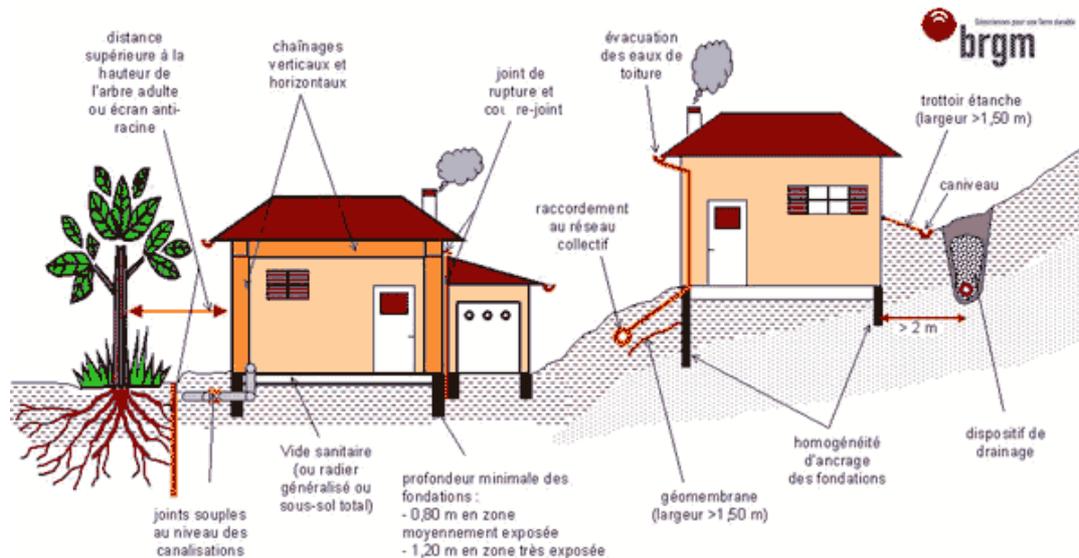


Illustration 25 - Principales préconisations émises dans le cadre des PPRN (source : BRGM)

Par ailleurs, l'expérimentation sur maquette en vraie grandeur reposant sur des vérins, conduite par le LCPC à Rouen et dont les premiers résultats seront publiés dans le rapport final du projet ARGIC, met en évidence le fait qu'une maison individuelle en maçonnerie de parpaings, construite dans le respect des règles de l'art détaillées dans les DTU (Documents Techniques Unifiés, valant normes) avec chaînages, résiste sans fissuration à une perte d'appui sur la moitié de sa surface.

Cette conclusion pourrait peut-être permettre d'alléger encore les mesures forfaitaires prescrites dans les PPR actuels. En effet, si ces observations devaient se confirmer, elles signifieraient qu'il n'est pas nécessaire d'approfondir les fondations ni de multiplier les mesures visant à limiter les variations de teneur en eau dans le sol (mesures jugées à juste titre contraignantes, notamment dans les sites urbains avec parcelles exigües), mais qu'il suffit de construire correctement les maisons avec des chaînages sur toute la hauteur et à chaque niveau, un placement optimum des armatures et une qualité satisfaisante pour le béton et le mortier de jointoiment. Dans cette hypothèse, la prévention du phénomène pourrait inciter à rendre obligatoire le respect des normes de construction actuelles (DTU) et un minimum de contrôle de qualité sur chantier effectué par des organismes extérieurs en particulier lors de la réalisation des fondations et des chaînages. Ceci permettrait de rendre plus acceptables les mesures de prévention préconisées pour les futures constructions qui se traduiraient alors par des surcoûts très modérés.

Concernant les constructions existantes, les dispositions des PPR qui concernent ce type de bien sont relativement légères puisqu'elles se limitent à ne pas aggraver la vulnérabilité du bien vis-à-vis du risque de retrait-gonflement.

5.2. MESURES D'ADAPTATION ENVISAGEABLES A L'AVENIR

Bien que les constructions existantes semblent être la source majeure de la sinistralité à venir du fait du changement climatique attendu (d'après l'étude départementale, pour le scénario A2max sur la période 2010-2030, environ 90 % des sinistres seront dus aux constructions existantes), cette étude s'intéresse **uniquement aux futures constructions** étant donné le manque de données et de connaissance sur des éventuelles mesures d'adaptation pour les maisons individuelles existantes.

5.2.1. Evolutions prévisibles des sollicitations

L'hypothèse adoptée par le groupe de travail quant aux évolutions prévisibles de l'aléa retrait-gonflement aux différentes échéances étudiées, est que cette évolution se traduira par une augmentation de la fréquence des périodes de sécheresse préjudiciable à la stabilité des maisons construites sur sol argileux, sans pour autant que l'amplitude des mouvements du sol ne soit modifiée de manière significative. L'incertitude qui existe quant à l'évolution prévisible des conditions météorologiques notamment en matière de précipitations, et la difficulté à relier de manière déterministe ces facteurs de déclenchement climatiques aux mouvements de tassement et de gonflement du sol, surtout à l'échelle de l'ensemble du territoire national, ne permettent de toute façon pas d'affiner davantage les prévisions dans l'état actuel des connaissances. On peut néanmoins se poser légitimement la question de ce qui se passerait si l'amplitude de ces mouvements augmentait dans de fortes proportions : les mesures de prévention actuellement préconisées seraient-elles alors encore suffisantes ?

D'une part, il semble que la réponse à cette question varie selon la démarche adoptée. Dans l'optique d'un traitement purement géotechnique du problème, qui consiste à concevoir le mode de fondation le plus adaptée pour permettre à la construction de résister quelle que soit l'amplitude des mouvements du sol d'assise, ce point est effectivement crucial. Les différentes observations disponibles après suivi *in situ* du profil hydrique de sols argileux montrent que les profondeurs du front de dessiccation en période estivale dépassent couramment 1 m à 1,50 m, au moins dans le Sud de la France, et qu'elles peuvent atteindre 3 à 4 m à proximité de certains arbres. C'est pourquoi les géotechniciens qui dimensionnent les fondations de maisons pour les mettre à l'abri des tassements induits par de telles variations hydriques saisonnières auront tendance à préconiser un approfondissement des profondeurs d'ancrage des fondations.

D'autre part, dans le cas d'une démarche préventive plus globale, conforme à celle préconisées par les mesures forfaitaires des actuels PPR sécheresse, les fondations ne sont pas conçues pour résister à elles seules aux effets du retrait-gonflement, ce qui explique la relative modestie des profondeurs d'ancrage préconisées. Dans cette

approche, il s'agit plutôt de limiter les sollicitations hydriques saisonnières dans le massif de sol proche des fondations et de renforcer la résistance globale de la structure vis-à-vis d'éventuels tassements différentiels.

Ces deux voies complémentaires méritent d'être explorées car elles ne se traduiront pas nécessairement par le même type d'approche en termes de stratégie de mise en œuvre. Il convient cependant de bien garder à l'esprit que le recul manque pour juger de la validité et de l'efficacité en termes de rapport coûts/bénéfices des mesures constructives préventives actuellement préconisées, ce qui incite à une certaine prudence quant à leur extrapolation ou leur adaptation éventuelle.

5.2.2. Adaptation des fondations de maisons individuelles

Compte tenu de la typologie des maisons impactées par le phénomène de retrait-gonflement, notre réflexion se concentrera sur la partie fondation des structures. Ce type d'approche est *a priori* celle du géotechnicien qui, après étude des caractéristiques du sol, définit les mesures d'adaptation des fondations pour que la maison résiste à d'éventuels tassements différentiels, ceci sans toucher à la structure elle-même ni à son environnement.

Sur la base de ces réflexions engagées à l'INERIS (Kazmierczak *et al.*, 2008), trois propositions sont émises. Elles consistent à :

- 1° concevoir des fondations superficielles différemment ;
- 2° s'interroger sur la pertinence d'utiliser des fondations « semi-profondes » ou de réaliser un sous-sol complet ;
- 3° utiliser des fondations profondes protégées ou prévues pour résister aux phénomènes « parasites ».

L'illustration 26 présente les trois propositions techniques évoquées.

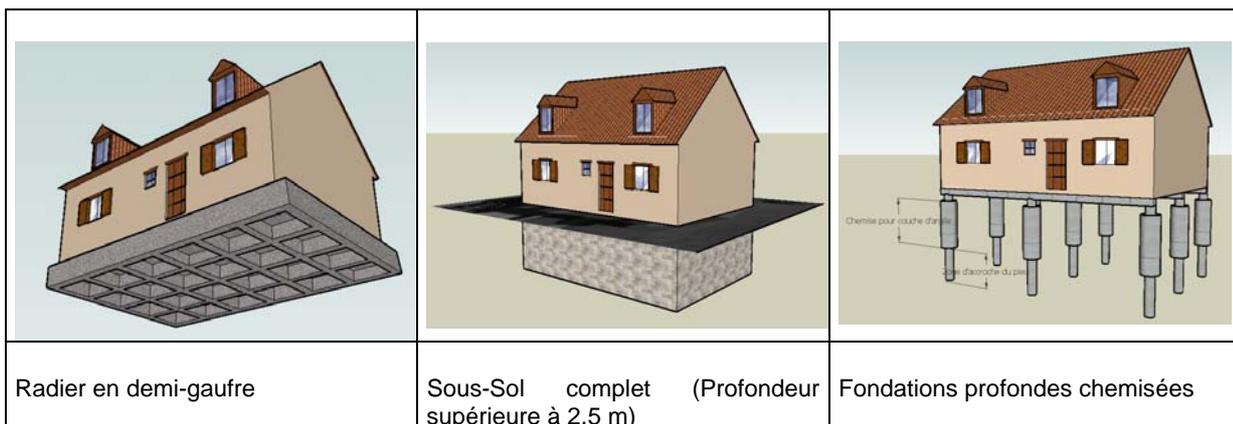


Illustration 26 - Trois propositions techniques relatives aux fondations de l'habitation (Source INERIS)

Les avantages, inconvénients et coûts de ces trois propositions sont présentés sur l'illustration 27. Les deux dernières colonnes du tableau représentent le coût en pourcentage de la valeur du bien. Celui-ci comporte deux composantes :

- le coût de la construction de l'habitation¹¹ qui varie peu en fonction de la région d'implantation : 100 k€ environ, incluant les frais divers (étude, raccordement, notaire, etc), ce type de maison étant assez représentative du portrait-robot des maisons sinistrées ;
- le coût du terrain¹² (Illustration 28) qui s'étale de 12 à 150 k€ en fonction de l'implantation. De fortes variations existent au sein d'une même région. Même si le terrain n'entre pas en jeu dans la sinistralité, l'idée est ici de relativiser le coût relatif des mesures d'adaptation par rapport au bien global dans l'optique de revendre du bien.

Solutions	Avantages	Inconvénients	Coût par m ² (€/m ²)	Coût relatif (k€)	% du bien Min	% du bien Max
Radier en demi-gaufre	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter la déformation localisée de l'habitation ; • Quantité de béton inférieure à un radier classique « plan » de même efficacité ; • Existence de noyaux préfabriqués ou de coffrages biodégradables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre peu courante en France. • Quantité d'acier importante ; • Utilisation d'un béton non « standard » ; • N'empêche pas l'habitation de subir un mouvement d'ensemble ; • Chainage complet renforcé de la structure • Garantie constructeur ? 	250	25 k€ -10 k€ = ~15 k€	6%	13%
Sous-sol complet	<ul style="list-style-type: none"> • Extraire sur une épaisseur pluri-métrique le matériau argileux à l'origine des désordres ; • Transférer les fondations de l'habitation vers une zone moins impactée par les phénomènes de retrait-gonflement ; • Disposer d'un volume utile supplémentaire. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solution non recommandée dans les zones soumises à des mouvements de terrain de type affaissement minier ; • Nécessite de réaliser une fondation liaisonnée sous le sous-sol (ou un système poutre-voile). 	150	15 k€	6%	13%
Fondation profonde	<ul style="list-style-type: none"> • Transmission très réduite de la déformation du sol vers la maison ; • Impact limité d'un approfondissement de l'effet de la sécheresse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite des moyens de mise en œuvre plus conséquents ; • Etude de sol jusqu'à une profondeur plus importante ; • Prévoir un réseau de longrines dimensionnées en fonction de l'espacement des pieux. 	250	25 k€	10%	22%

(-10 k€ = cout de la fondation classique déjà intégré dans le prix du bien)

Illustration 27 - Tableau comparatif des trois propositions d'amélioration visant les fondations

D'un point de vue technique, ces trois propositions n'en sont pas au même stade de maturité. Ainsi, le sous-sol complet pourra être réalisé très classiquement alors que le radier en demi-gaufre n'en est encore qu'au stade d'étude (en France). La fondation profonde chemisée est une technique peu courante qui n'est utilisée qu'en cas de besoin spécifique.

¹¹ Description de l'habitation considérée : De plain pied - Façade droite - Architecture simple - Tuiles normales 10/m² - Pas de sous-sol - Mur enduit - Combles perdus - 100 à 110 m² habitables - 3 chambres, une salle de bain, 1 WC - Finition normale avec carrelage - Chauffage électrique par convecteurs - Pas de cheminée, pas de cuisine équipée - Pas d'équipement domotique

¹² Il s'agit d'un terrain de surface moyenne 800 à 900 m², correspondant à la moyenne nationale.

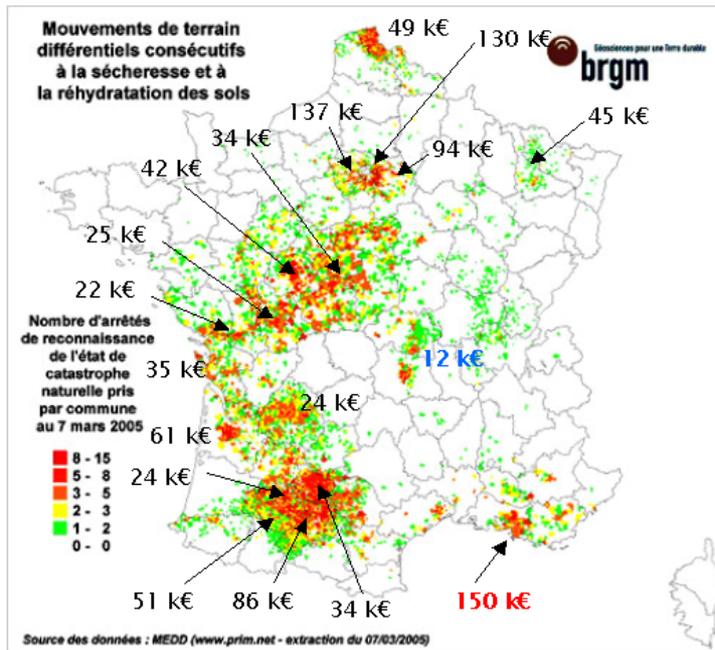


Illustration 28 - Coût des terrains en fonction de l'implantation

On constate ainsi que ces solutions techniques augmentent le prix du bien de 6 à 22 % selon le coût du terrain et de 15 à 25 % par rapport au coût de la seule maison individuelle.

5.2.3. Dispositions globales

Une approche plus globale qui vise simultanément à améliorer la qualité de la construction, tant au niveau des fondations que de sa structure, tout en diminuant l'ampleur des sollicitations par une meilleure maîtrise des variations hydriques dans le sol, permet *a priori* d'éviter l'intervention systématique d'un bureau d'études géotechniques avant toute construction et se traduit par des surcoûts sensiblement moindres (bien que restant à actualiser de manière plus précise).

Il subsiste néanmoins de nombreuses interrogations quant à la pertinence et à l'efficacité des mesures ainsi préconisées. Le retour d'expérience suite à l'adoption des premiers PPR préconisant ce type d'approche ne permet pas encore de porter un jugement sur l'adéquation de ces dispositions. Les observations préliminaires effectuées par le LCPC dans le cadre du projet ARGIC sur maquette en vraie grandeur laissent penser que le simple respect des normes de construction pourrait suffire à protéger les maisons individuelles vis-à-vis de tassements différentiels, ce qui pourrait autoriser un allègement de ces mesures dites forfaitaires en rendant inutiles les mesures environnementales jugées souvent contraignantes. Dans cette hypothèse, qui reste néanmoins à vérifier, il serait probablement plus utile d'introduire des dispositifs de contrôle qualité systématique sur les chantiers de construction de maisons individuelles plutôt que d'y imposer des études géotechniques préalable comme cela est actuellement envisagé. Par ailleurs, l'état actuel des connaissances ne permet pas

de démontrer avec certitude que de telles dispositions, si elles étaient adoptées de manière systématique pour toutes les futures constructions de maisons individuelles, seraient suffisantes pour empêcher l'essentiel de la sinistralité par retrait-gonflement à l'horizon 2030 et *a fortiori* 2100, en cas d'aggravation significative des sollicitations.

5.3. PROJECTION DES COÛTS

Pour apprécier la pertinence des mesures de prévention décrites précédemment, il convient de rapporter le coût de ces mesures aux possibles coûts subis par une habitation tout au long de sa vie. On s'intéresse, par exemple, dans cette partie, à un pavillon type (paragraphe 2.1.2) de durée de vie de 30 ans, sur la période 2010-2030. Le détail des calculs est présenté en annexe 6.

Il apparaît facilement que mettre des fondations profondes sur l'ensemble des maisons individuelles construites à partir de 2009 dégagerait une perte au niveau national que ne compenseraient pas les espérances de gain sur le long terme. Il faut donc, pour faire de la prévention, commencer par repérer les zones dans lesquelles la probabilité qu'une maison subisse des dommages au long de sa vie soit suffisante pour justifier les mesures préventives.

Les calculs décrivant le processus de sélection du seuil considéré comme adéquat pour repérer les zones à probabilité suffisante sont développés en annexe 6. Sur la base des hypothèses de ce rapport, nous avons travaillé en discriminant les zones en fonction de la carte d'aléa réalisée par le BRGM pour le compte du ministère.

Il apparaît que pour des sinistres moyens d'environ 11 700 euros, il faut descendre à des sous-zones de la carte, par exemple « les Alpes de Haute-Provence en zone d'aléa fort », pour trouver des périmètres au sein desquels la prévention systématique est statistiquement rentable (pour la prévention « dispositions globales » et « adaptation des fondations »).

Par contre, si le coût moyen vient à augmenter (réalisation plus systématique de travaux structurels), on peut se permettre de délimiter des zones plus vastes, comme la zone d'aléa modéré (pour la prévention « dispositions globales », avec un sinistre moyen à 60 000 euros correspondant à une reprise en sous-œuvre).

Enfin, ces zones peuvent être encore élargies si on prend en compte le changement climatique, et l'accroissement du nombre de sinistres potentiels qu'il engendrera. Dans le cas par exemple d'un scénario de type « B2 max », l'approfondissement des fondations, sous l'hypothèse d'un sinistre moyen à 60 000 euros, devient rentable en zone d'aléa « fort ».

Le changement climatique, de par son intensité, va donc élargir le périmètre au sein duquel les dispositifs de prévention les plus lourds seront efficaces d'un point de vue économique.

5.4. EVALUATION DES MESURES D'ADAPTATION

L'analyse purement économique réalisée ci-avant révèle qu'une démarche de prévention qui s'appuie sur l'adaptation des fondations ou l'adoption de mesures plus globales (cf. paragraphe 5.2.3) pour les maisons individuelles n'apparaît « rentable » à l'échelle de la communauté (sur les maisons individuelles à construire) qu'en ciblant certaines zones fortement impactées par les problèmes de retrait-gonflement des argiles, et uniquement dans les zones d'aléa moyen à fort. Toutefois, il faudrait s'assurer au préalable qu'une maison individuelle construite dans le respect des règles en vigueur ne résiste pas à des tassements différentiels même de forte amplitude.

Toutefois, les hypothèses sur lesquelles se base cette analyse du rapport coûts/bénéfices de la prévention doivent être relativisées et des aspects plus subjectifs méritent d'être évoqués.

Tout d'abord, cette analyse s'appuie sur un coût de réparation moyen des dégâts relativement faible (~10 k€). Celui-ci correspond à la fois à des réparations d'ordre « esthétique » (rebouchage de fissure – peinture, pour quelques k€) mais aussi, pour partie, à des opérations de gros œuvre (approfondissement des fondations – reprises en sous-œuvre, généralement pour plusieurs dizaines de k€), le choix technique de la réparation relevant de l'assurance et de ses experts. Il est à noter que les habitations ayant subi des réparations d'ordre esthétique pourront être le siège de nouveaux sinistres (degré 2, voire plus), les autres étant potentiellement à l'abri du phénomène.

Faut-il aller vers des réparations plus pérennes, mais plus coûteuses, pour éviter les sinistres de degré supérieur ?

De plus, cette question en amène une autre qui relève cette fois d'aspects plus psychologiques. Les sinistres d'habitation sont généralement la cause de nombreux désagréments pour les particuliers qui se retrouvent confrontés à des procédures de réparation et d'indemnisation pouvant durer plusieurs années. Pendant toute cette période, le temps passé à gérer le problème (multiples expertises, relation avec l'assurance, interaction avec la garantie décennale et le constructeur, etc.) est rarement pris en compte dans une évaluation de coût. Par ailleurs, il devient très difficile de revendre son bien lorsque celui est dégradé ou en attente de réparation. Il peut alors être fortement déprécié, ce qui entraîne, qu'en plus du coût du sinistre, cette dépréciation devrait être envisagée.

Pour le particulier, ces désagréments peuvent paraître bien lointains tant que le premier désordre n'est pas survenu. Aussi, sans obligation réglementaire, il est difficile d'imaginer que celui-ci engagera des sommes supplémentaires pour être à l'abri d'un sinistre potentiel, surtout si celui-ci semble bien couvert par l'assurance. Dans un cas, le particulier devra financer la prévention, dans l'autre cas, c'est la communauté, via l'assurance, qui paiera les dégâts. Le mode de gestion de cet aléa par le système assurantiel est ici encore au premier plan.

La démarche de prévention peut par ailleurs apparaître intéressante lorsque celle-ci permet de résoudre plusieurs problèmes, voire d'apporter une fonction supplémentaire

à l'habitation. Ainsi, la réalisation d'un sous-sol complet (lorsque c'est techniquement possible) permet d'assurer une double fonction : fournir un volume supplémentaire à l'habitant et protéger efficacement des effets de la sécheresse. La réalisation de terrasses périphériques permet également d'améliorer la situation, tout en fournissant une fonction supplémentaire à l'habitation.

Enfin, il est à noter que toutes les mesures de prévention qui visent à renforcer la structure et la qualité des fondations ont aussi pour effet de protéger simultanément la construction contre d'autres aléas potentiels de nature géologique, dont l'aléa sismique (sachant que le nouveau zonage réglementaire en cours d'adoption étend de manière significative les zones exposées en France métropolitaine) mais aussi les autres types de mouvements de terrain (glissements, reptation de talus, tassement de terrains compressibles, affaissement lié à la présence de cavités souterraines, à la suffosion ou à la dissolution de certaines roches, etc.). Un tel effet augmente d'autant la pertinence technique et économique de ces mesures préventives.

6. Recommandations/Pistes d'action

Les recommandations et pistes d'action proposées dans la présente partie s'appuient sur les limites rencontrées lors de la réalisation de la présente étude et concernent l'amélioration de l'approche économique pour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'aléa retrait-gonflement, une meilleure caractérisation des phénomènes physiques et des recommandations constructives.

6.1. AMELIORATION DE L'APPROCHE ECONOMIQUE

L'approche économique menée dans la présente étude pourrait être améliorée moyennant le recueil de données plus précises :

- en termes d'aléa, la carte utilisée est provisoire dans certains départements pour lesquels elle sera remplacée, d'ici fin 2010, par une carte d'aléa plus précise, issue du programme de cartographie national ;
- en termes de sinistres, les données sont loin d'être exhaustives : la constitution d'une base de données nationale actualisée regroupant l'ensemble des sinistres déclarés et/ou indemnisés paraît indispensable pour mieux caractériser cette sinistralité ;
- le coût moyen des sinistres communiqué par la CCR demande également à être précisé et modulé département par département ;
- la croissance du nombre de maisons individuelles du fait des nouvelles constructions devrait être également précisée par une analyse plus fine des politiques d'urbanisme envisagées et de l'évolution probable des zones constructibles, car ce paramètre influe de manière significative sur le résultat des simulations.

6.2. MEILLEURE CARACTERISATION DES PHENOMENES PHYSIQUES

L'état actuel des connaissances ne permet pas de pousser l'analyse plus loin car plusieurs points restent à préciser, dans le cadre d'un effort de recherche qui reste à poursuivre :

- les scénarios de changement climatique actuellement disponibles demandent à être régionalisés et précisés, notamment en termes d'évolution prévisible des précipitations, ce qui permettrait d'affiner les hypothèses prises en compte pour les simulations. Ceci permettrait en particulier de vérifier si seule la fréquence des périodes de sécheresse exceptionnelle est susceptible d'augmenter ou si l'amplitude du phénomène est également amenée à s'aggraver ;

- les relations déterministes permettant de relier les conditions météorologiques, l'évolution de la teneur en eau dans le sol, et les mouvements de tassement/gonflement qui en résultent, restent largement à établir pour envisager des simulations plus précises à l'échelle nationale, selon une approche paramétrique même si de telles approches sont déjà à l'épreuve (par exemple, à Météo-France) ;
- l'impact des tassements différentiels du sol sur la déformation et la fissuration de structures de type maisons individuelles en maçonnerie, est encore difficile à quantifier, ce qui rend délicate la justification des recommandations constructives préconisées.

6.3. RECOMMANDATIONS CONSTRUCTIVES

La sinistralité liée au retrait-gonflement des sols argileux coûte déjà très cher à la collectivité et la réflexion du groupe de travail indique qu'elle devrait encore s'accroître, de manière significative, avec le changement climatique attendu.

Jusqu'à présent, malgré l'intégration de la sécheresse au système d'indemnisation Cat-Nat, les dispositions visant à réduire la sinistralité elle-même en imposant des règles constructives préventives adaptées sont restées timides.

Concernant la prévention pour les futures constructions de maisons individuelles (dont la croissance ne faiblit pas jusqu'à présent, avec plus de 200 000 nouvelles maisons chaque année), l'adoption, dans toutes les communes exposées, soumises à une forte pression foncière, de Plans de Prévention des Risques naturels (PPR) spécifiques semble un impératif à généraliser rapidement. Il subsiste certes toujours des interrogations quant à la nécessité de certaines des dispositions de ces PPR, surtout au regard des expérimentations en cours par le LCPC sur maquettes en vraie grandeur qui tendraient à montrer que le seul respect des normes de construction pourrait suffire à protéger les maisons individuelles vis-à-vis de tassements différentiels dus au retrait-gonflement des sols argileux. Néanmoins, l'architecture globale du règlement de ces PPR, qui ont déjà été soumis à de nombreuses reprises à enquête publique, fait désormais l'objet d'un large consensus de la part des différents organismes concernés, ce qui permet d'en imaginer la généralisation, tout en poursuivant les efforts de recherche en vue d'affiner et peut-être alléger certaines de ces dispositions constructives préventives, en particulier celles qui ont pour effet de limiter l'impact de l'environnement proche sur l'état hydrique du sol et qui sont jugées comme les plus contraignantes, surtout dans le cas de parcelle exigües en site urbain.

Concernant les constructions existantes, les dispositions des PPR qui concernent ce type de bien sont relativement légères puisqu'elles se limitent à ne pas aggraver la vulnérabilité du bien vis-à-vis du risque de retrait-gonflement. Là encore, un effort de recherche appliquée est sans doute nécessaire pour aider à les préciser et à en augmenter l'efficacité.

Une dernière voie à explorer consisterait à améliorer le choix des techniques de confortement les plus adaptées afin d'éviter l'apparition de sinistres de deuxième

génération sur les maisons déjà réparées. Des actions de recherche ayant pour objectif d'étudier le rapport efficacité/coût et les limites d'utilisation des différentes techniques connues de réparation (ainsi que leur couplage), pour des maisons individuelles sinistrées par le phénomène de retrait-gonflement, paraissent ainsi souhaitables.

7. Conclusion

En application du Plan Climat français (2006), un groupe de travail interministériel a été constitué en mars 2007 pour une durée de 2 ans sur le thème « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France », afin de procéder à une première évaluation des dommages attendus du fait du changement climatique et d'identifier des mesures permettant d'en limiter les impacts.

Ce rapport est le fruit de l'expertise collective de la subdivision « retrait-gonflement des sols argileux » du groupe de travail « Risques naturels, assurances et mesures d'adaptation au changement climatique ». Sous réserve de nombreuses limites et incertitudes exposées dans le présent rapport, l'étude a mis en évidence les éléments suivants :

- à enjeux constants (ce qui revient à supposer soit qu'il n'y ait pas de construction de nouvelles maisons soit que tous les bâtiments nouvellement construits soient invulnérables au retrait-gonflement), les coûts moyens annuels des dommages imputables au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux devraient augmenter, selon l'hypothèse de changement climatique retenue, de 20 à 220 % à l'horizon 2030, de 45 à 330 % à l'horizon 2050 et être multipliés par 3 à 6 fois d'ici la fin du siècle. Ainsi, le changement climatique pourrait induire une augmentation du coût des dommages sur la période 2010-2030 de l'ordre de 7 à 55 % pour le scénario A2 et de l'ordre de 7 à 30 % pour le scénario B2 ;
- l'évolution prévisible du nombre de maisons individuelles exposées au phénomène (extrapolée à partir des taux d'accroissement observés ces dernières années) intervient pour une part non négligeable dans l'accroissement prévisible de la sinistralité, puisqu'elle se traduit par une augmentation de l'ordre de 27 % avec les différents scénarios de changement climatique à l'horizon 2030, sauf à adopter rapidement des mesures constructives adéquates. En considérant une évolution de l'urbanisation différenciée selon les départements (par extrapolation des taux de croissance démographiques sur la période 1989-99), le changement climatique pourrait ainsi induire une augmentation des coûts cumulés sur la période 2010-2030 nettement plus significative : entre 36 et 98 % avec le scénario A2 et entre 36 et 66 % dans le cas du scénario B2 par rapport au cas sans changement climatique et à enjeux constants. Cela montre à la fois l'importance de prendre en compte l'évolution des enjeux dans une telle étude et l'importance des politiques d'adaptation des constructions.
- du fait du changement climatique, dans l'hypothèse d'une augmentation du nombre de maisons individuelles exposées, certains départements pourraient voir leur coût cumulé de dommages sur la période 2010-2030 être multiplié par 10, d'autres plus couramment par 4 ou 5 (dans l'hypothèse de changement climatique la plus défavorable). Cette conclusion reste cependant à confirmer par l'intégration de scénarios régionalisés de changement climatique ;

- afin de prévenir le phénomène, il est nécessaire d'adopter un certain nombre de mesures préventives pour les nouvelles constructions dans les zones où les proportions de maisons individuelles sinistrées sont les plus fortes. Ceci suppose une accélération de la mise en œuvre de plans de prévention des risques ou, à défaut, l'adoption de mesures nationales d'adaptation des constructions au sol. Rendre obligatoire le respect des règles de constructions en vigueur (D.T.U.) pourrait déjà contribuer à diminuer significativement la sinistralité pour les futures constructions, mais il reste à vérifier qu'une telle mesure suffirait à elle seule à protéger les maisons individuelles vis-à-vis de tassements différentiels dus au retrait-gonflement des sols argileux ;
- une meilleure connaissance du rapport coût/efficacité des techniques de constructions mais aussi des techniques de réparation des maisons individuelles sinistrées est nécessaire pour améliorer l'évaluation des mesures d'adaptation à mettre en œuvre pour lutter efficacement contre le phénomène.

L'étude réalisée mériterait donc d'être poursuivie en tentant d'améliorer les scénarios de changement climatique actuellement disponibles, par exemple en les régionalisant et les précisant, notamment en termes d'évolution prévisible des précipitations. Ceci permettrait de déterminer l'évolution probable de l'intensité du phénomène et notamment l'effet de plusieurs épisodes successifs de type 2003. De même, l'étude économique pourrait être affinée sous réserve d'une meilleure connaissance de la sinistralité passée et du coût moyen des sinistres.

Bibliographie

ABI - Association of British Insurers (2005) - « Financial Costs of Climate Change, Technical Annexes », London

Arbizzi S., Kreziak C. (LREP – DREIF), sous la coordination de **Magnan J.-P. et Duc M.** (2009) – Projet ANR ARGIC, rapport scientifique du LCPC, tâches 5 et 6.- Analyse de dossiers de sinistres en vue d'établir une pathologie des désordres. Analyse économique des techniques de confortements. Rapport LCPC, opération de recherche 13M06561, 65 p., 11 tabl., 35 ill., 3 ann.

Bordes M. et Després R. (2008) – Exemples concrets et illustrés des effets de période de sécheresse prolongée sur des constructions situés sur des sols argileux à forts aléas. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 367-375

Boutin C. (2007) – Rapport du gouvernement au parlement sur l'indemnisation des dommages aux bâtiments causés par la sécheresse survenue durant l'été 2003.

Déqué M. pour le groupe interministériel (2002) - Impact des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent de température et de précipitations. Rapport final disponible en ligne au 24/01/09 à l'adresse suivante : <http://www.ecologie.gouv.fr/4-02-Impacts-des-changements.html>

Dorelon P. et Poupat B. (2008) – Méthodologie d'estimation des enjeux exposés aux inondations. Document technique de l'IFEN. Pp.11.

Dumas P., Chavarot A., Legrand H., Macaire A., Dimitrov C, Martin X., Queffelec C. (2005) – Mission d'enquête sur le régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles - Rapport particulier sur les risques de subsidence dus a la secheresse.

EEA (2008) - Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment. **European Environment Agency** report No 4.

Exbrayat L. (2001) - Dispositions constructives de nature à prévenir et/ou supprimer les effets de la dessiccation/réhydratation des sols - évaluation des coûts - SOLEN GEOTECHNIQUE n°G01339GT

Kazmierczak J-B., Laouafa F., Maison T. (2008) - Etude d'adaptation des fondations de maisons individuelles dans les zones exposées au retrait-gonflement" - SEC 2008 - Editions du LCPC, pp 337-342

Philipponat G. (1978) – Désordres dus à la présence de sols gonflants dans la région parisienne. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, n° 364, p. 1-15

Vincent M. (2006) – Retrait-gonflement des sols argileux : un aléa géologique lié aux conditions climatiques – *Géosciences (la Revue du BRGM pour une Terre Durable)*, n° 3, mars 2006, pp. 50 à 55

Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.-M. (LMSSMat), Masrouri F. (LAEGO), Oppenheim E. (CEBTP-Solen), Heck J.-V. (CSTB), Raux N. (CSTB), Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. (2006) - Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti – rapport final. BRGM/RP-54862-FR, 378 p., 308 ill.

Vincent M., Plat E., Le Roy S. (2007) - Cartographie de l'aléa Retrait-Gonflement et Plans de Prévention des Risques. *Revue Française de Géotechnique* n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp. 189-200

Vincent M., Hédou F., Chirouze M., Plat E., Le Roy S. (2008) – Cartographie à l'échelle départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux à des fins préventives. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 55-62

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 de synthèse final du projet ARGIC (Analyse du retrait-gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) – Projet ANR-05-PRGCU-005. 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, x p., x ill., x ann.

Annexe 1
Coûts d'indemnisation des sinistres liés au
retrait-gonflement des sols évalués sur la période
1989-2003 par la CCR et communiqués au
11/09/08

Cette annexe présente les coûts (non actualisés) fournis par la CCR au 11/09/08 au niveau départemental et au niveau national par exercice pour la période 1989-2003. Ces chiffres sont issus d'une extrapolation par la CCR des données que les assureurs lui ont transmises. Pour les années postérieures à 2003, les arrêtés CatNat étant parus en 2008, les coûts des sinistres n'ont pas pu être pris en compte à la date de réalisation de la présente étude.

Coûts par départements

Departement	Coût départemental
1	5 122 241
2	1 425 150
3	27 516 465
4	46 883 324
5	11 145
6	25 492 530
7	997 775
8	16 318
9	6 708 228
10	2 928 622
11	24 349 026
12	1 059 247
13	216 619 178
14	2 967 075
15	12 144
16	27 771 850
17	64 592 349
18	18 103 835
19	45 718
2A	
2B	
21	12 179 992
22	
23	
24	113 030 788
25	753 308
26	656 420
27	4 211 797
28	13 120 696
29	
30	11 055 386
31	381 078 320
32	101 564 648

Departement	Coût départemental
33	125 829 494
34	76 610 315
35	2 200 295
36	21 671 592
37	48 241 702
38	70 301
39	6 191 473
40	1 932 501
41	28 839 619
42	2 894 538
43	6 886 149
44	2 069 275
45	115 430 479
46	2 416 799
47	79 694 728
48	154 711
49	16 754 049
50	
51	830 214
52	1 200 921
53	236 681
54	46 765 778
55	717 030
56	406 723
57	23 847 627
58	6 111 981
59	110 002 706
60	1 918 195
61	851 740
62	36 360 943
63	171 385 666
64	21 206 387
65	8 688 777

Departement	Coût départemental
66	648 726
67	1 345 236
68	160 444
69	9 092 028
70	1 730 308
71	18 162 916
72	18 978 426
73	118 000
74	181 066
75	708 552
76	
77	269 356 601
78	292 773 618
79	32 556 387
80	
81	140 866 172
82	116 385 934
83	53 241 591
84	30 216 560
85	8 305 704
86	63 664 195
87	45 239
88	384 024
89	23 772 800
90	80 665
91	216 013 388
92	81 854 145
93	161 000 707
94	212 911 381
95	71 246 005

Coûts par exercices

EXERCICE	COUT MARCHE
1989	232 676 000
1990	369 625 000
1991	219 070 000
1992	173 598 000
1993	173 166 000
1994	62 701 000
1995	140 449 000
1996	421 941 000
1997	300 992 000
1998	403 845 000
1999	103 222 000
2000	85 657 000
2001	16 797 000
2002	181 374 000
2003	1 019 380 000

Annexe 2

Nombre de maisons individuelles par zone d'aléa dans chaque département (Simulation SOES)

Département		Nombre de maisons individuelles				
		Total sur le département	Alea			
INSEE	NOM		Faible	Moyen	Fort	Tous aleas
01	AIN	152 137	108 867	41 501		150 368
02	AISNE	178 808	106 173	61 086	846	168 105
03	ALLIER	131 715	87 975	19 952	4 523	112 449
04	ALPES HTE PROVENCE	64 787	32 239	15 215	2 222	49 676
05	HAUTES ALPES	44 209	27 344	4 134		31 478
06	ALPES MARITIMES	159 796	85 685	24 339	0	110 024
07	ARDECHE	120 574	43 212	5 620	0	48 832
08	ARDENNES	87 965	68 669	6 883	1 236	76 788
09	ARIEGE	72 605	37 338	13 647	0	50 985
10	AUBE	88 904	52 860	7 603	20	60 483
11	AUDE	145 626	86 841	39 065	759	126 664
12	AVEYRON	108 768	45 724	3 314		49 038
13	BOUCHES DU RHONE	315 439	168 174	31 325	11 877	211 376
14	CALVADOS	200 230	108 285	29 285	2 474	140 045
15	CANTAL	65 110	18 895	7 142		26 037
16	CHARENTE	136 034	61 555	37 282	3 521	102 357
17	CHARENTE MARITIME	259 786	37 049	67 265	20 567	124 880
18	CHER	124 107	60 382	17 715	6 741	84 837
19	CORREZE	103 425	30 227	90		30 317
21	COTE D OR	134 590	67 892	36 161		104 053
22	COTES D ARMOR	241 191	53 379	357		53 736
23	CREUSE	68 777	1 973			1 973
24	DORDOGNE	177 556	42 369	30 457	12 988	85 813
25	DOUBS	118 642	98 918	16 220		115 138
26	DROME	132 877	112 766	9 360	1 073	123 199
27	EURE	183 719	118 899	37 086	2 711	158 695
28	EURE ET LOIR	135 456	55 887	44 858	211	100 956
29	FINISTERE	319 735	39 843	5		39 848
2A	CORSE DU SUD	46 622	1 796			1 796
2B	HAUTE-CORSE	52 875	18 895	74		18 969
30	GARD	196 283	118 046	35 737	203	153 986
31	HAUTE-GARONNE	260 949	175 930	69 763		245 693
32	GERS	72 727	3 945	59 678		63 623
33	GIRONDE	420 621	205 233	135 424	4 630	345 287
34	HERAULT	268 676	180 908	27 188	2 346	210 441
35	ILLE-ET-VILAINE	254 983	154 740	1 109		155 849
36	INDRE	100 827	49 849	16 460	10 748	77 056
37	INDRE-ET-LOIRE	164 753	57 346	47 765	26 100	131 212
38	ISERE	248 024	209 578	13 615		223 193

Département		Nombre de maisons individuelles				
		Total sur le département	Alea			
INSEE	NOM		Faible	Moyen	Fort	Tous aleas
39	JURA	83 460	57 309	25 808		83 118
40	LANDES	142 698	55 291	28 869		84 160
41	LOIR-ET-CHER	122 992	78 153	29 205	6 102	113 460
42	LOIRE	165 772	40 677	15 901		56 578
43	HAUTE-LOIRE	92 203	4 279	28 082		32 361
44	LOIRE ATLANTIQUE	351 442	186 422	12 984		199 406
45	LOIRET	194 279	77 316	74 411	26 202	177 929
46	LOT	78 600	49 331	3 372		52 703
47	LOT-ET-GARONNE	122 064	59 017	45 426	0	104 443
48	LOZERE	39 618	9 008	1 252		10 261
49	MAINE-ET-LOIRE	219 270	129 162	8 543	10 436	148 142
50	MANCHE	191 458	70 470	212		70 683
51	MARNE	138 194	55 812	19 506	2 020	77 338
52	HAUTE-MARNE	68 702	39 225	5 418	1 132	45 775
53	MAYENNE	103 557	36 327	42		36 369
54	MEURTHE-ET-MOSELLE	172 298	85 003	50 675		135 678
55	MEUSE	66 970	33 121	7 438	896	41 456
56	MORBIHAN	260 918	84 578	1 355		85 933
57	MOSELLE	231 112	130 573	14 361		144 934
58	NIEVRE	103 133	71 661	10 297		81 958
59	NORD	713 416	366 447	216 386	41 390	624 222
60	OISE	207 368	145 537	58 143	3 675	207 355
61	ORNE	114 251	33 247	41 268	0	74 516
62	PAS-DE-CALAIS	469 181	258 332	76 025	8 560	342 917
63	PUY-DE-DOME	203 177	29 643	70 211	9 883	109 737
64	PYR.ATLANTIQUES	164 890	117 410	23 478	9 058	149 946
65	HAUTES-PYRENEES	77 739	56 902	5 101		62 003
66	PYRENEES-ORIENTALES	151 336	106 435	0		106 436
67	BAS-RHIN	203 661	129 946	7 808		137 754
68	HAUT-RHIN	154 654	92 956	938		93 894
69	RHONE	211 928	112 664	13 962		126 625
70	HAUTE-SAONE	83 346	52 550	2 901		55 451
71	SAONE-ET-LOIRE	189 435	117 912	31 670		149 583
72	SARTHE	183 146	105 336	59 186	4 704	169 226
73	SAVOIE	104 745	67 495	10 731		78 226
74	HAUTE-SAVOIE	151 981	126 309	9 514		135 823
75	PARIS	12 592	1	1	0	2
76	SEINE-MARITIME	302 416	291 398	9 337	180	300 915
77	SEINE-ET-MARNE	298 847	181 616	43 831	28 318	253 765
78	YVELINES	239 530	86 509	49 218	18 650	154 376

Département		Nombre de maisons individuelles				
		Total sur le département	Alea			
INSEE	NOM		Faible	Moyen	Fort	Tous aleas
79	DEUX-SEVRES	136 007	26 169	16 971	12 614	55 755
80	SOMME	188 192	172 649	5 452	879	178 980
81	TARN	134 171	69 549	34 829		104 378
82	TARN-ET-GARONNE	76 617	54 838	15 629		70 468
83	VAR	265 185	192 274	23 553	0	215 827
84	VAUCLUSE	158 208	125 612	15 691	2 737	144 040
85	VENDEE	270 765	123 728	21 928	0	145 656
86	VIENNE	146 203	73 991	32 694	6 460	113 145
87	HAUTE-VIENNE	122 038	2 910	18		2 928
88	VOSGES	122 503	41 621	1 375		42 996
89	YONNE	137 092	74 455	12 522	2 186	89 164
90	T. DE BELFORT	27 936	21 509	770		22 279
91	ESSONNE	223 872	97 293	75 352	39 368	212 013
92	HAUTS-DE-SEINE	84 864	26 129	15 337	9 443	50 909
93	SEINE-ST-DENIS	148 613	82 384	56 412	8 134	146 930
94	VAL-DE-MARNE	126 973	86 372	22 676	15 518	124 566
95	VAL-D-OISE	202 861	105 888	59 193	10 072	175 152
TOTAL		15 918 387	8 244 437	2 537 052	394 411	11 175 900

Annexe 3

Détail du calcul des proportions de maisons individuelles sinistrées

Départements pour lesquels la cartographie de l'aléa retrait-gonflement a déjà été réalisée (ensemble D1)

Pour chaque département de D1, calcul de la proportion de maison individuelle sinistrée par zone d'aléa i (i valant faible, moyen ou fort), pour un type d'évènement donné ta (ta correspondant à un évènement de type 2003 ou une année « bruit de fond »), notée P_i^{ta} :

$$P_i^{ta} = \frac{Nb_sin_i^{ta}}{Nb_MI_i}$$

où $Nb_sin_i^{ta}$ est le nombre de sinistre connu par le département sur la zone d'aléa i pour l'évènement ta et Nb_MI_i , le nombre de maisons individuelles en zone d'aléa i .

Au niveau national, calcul des deux taux moyens de progression entre les proportions de maisons individuelles sinistrées entre les zones d'aléa faible et moyen, T_{1-2} , et entre les zones d'aléa faible et fort, T_{1-3} . Ce calcul est réalisé en faisant la moyenne sur tous les départements de D1 des proportions de maisons individuelles sinistrées pour chaque zone d'aléa, notées P_{moy_1} pour la zone d'aléa faible, P_{moy_2} pour la zone d'aléa moyen et P_{moy_3} pour la zone d'aléa forte.

$$T_{1-2} = \frac{P_{moy_2}}{P_{moy_1}}$$

On a alors :

$$T_{1-3} = \frac{P_{moy_3}}{P_{moy_1}}$$

Départements pour lesquels la cartographie de l'aléa retrait-gonflement n'est pas disponible (ensemble D2)

Pour chaque département de D2, calcul de la proportion de maison individuelle sinistrée par zone d'aléa i (i valant faible, moyen ou fort), pour un type d'évènement donné ta (ta correspondant à un évènement de type 2003 ou une année « bruit de fond »), notée $P_i'^{ta}$.

- Pour la zone d'aléa faible, pour un évènement ta donné, la proportion vaut :

$$P_1'^{ta} = \frac{Nb_sin^{ta}}{Nb_MI_1 + T_{1-2} \cdot Nb_MI_2 + T_{1-3} \cdot Nb_MI_3}$$

où Nb_sin^{ta} est le nombre de sinistre total du département pour l'évènement ta , et Nb_MI_i , le nombre de maisons individuelles présentes sur la zone d'aléa i (i prenant la valeur faible, moyen et fort).

- Pour les zones d'aléa moyen et fort, cette proportion vaut respectivement :

$$P_2'^{ta} = T_{1-2} \cdot P_1'^{ta}$$

$$P_3'^{ta} = T_{1-3} \cdot P_1'^{ta}$$

Annexe 4

Pourcentage de maisons individuelles sinistrées annuel par département pour l'année 2003 et entre 1989 et 2002 (Simulation BRGM)

Département		Année 2003			Période 1989 - 2002		
INSEE	NOM	Pourcent age MI sinistrées Aléa Faible	Pourcent age MI sinistrées Aléa moyen	Pourcent age MI sinistrées Aléa fort	Pourcent age MI sinistrées Aléa faible	Pourcent age MI sinistrées Aléa moyen	Pourcent age MI sinistrées Aléa fort
01	AIN	0,1990%	0,6645%		0,0037%	0,0124%	
02	AISNE	0,0054%	0,0181%	0,0268%	0,0416%	0,1389%	0,2059%
03	ALLIER	1,0958%	2,5120%	6,0363%	0,0435%	0,0998%	0,2399%
04	ALPES-DE-HAUTE- PROVENCE	0,6865%	3,3163%	17,1281%	0,1501%	0,7251%	3,7449%
05	HAUTES-ALPES	0,0561%	0,1874%		0,0000%	0,0000%	
06	ALPES-MARITIMES	1,5244%	5,0915%		0,0604%	0,2019%	
07	ARDECHE	0,2162%	0,7221%		0,1477%	0,4933%	
08	ARDENNES	0,0027%	0,0089%	0,0132%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
09	ARIEGE	0,4265%	2,8096%		0,0078%	0,0511%	
10	AUBE	0,3213%	0,1960%		0,0073%	0,0044%	0,0000%
11	AUDE	0,5870%	2,1222%	1,7572%	0,0333%	0,1202%	0,0996%
12	AVEYRON	0,1367%	0,1105%		0,0114%	0,0092%	
13	BOUCHES-DU- RHONE	1,0099%	3,8463%	4,3176%	0,3508%	1,3361%	1,4999%
14	CALVADOS	0,0048%	0,0183%	0,2375%	0,0054%	0,0204%	0,2654%
15	CANTAL	0,0028%	0,0093%		0,0000%	0,0000%	
16	CHARENTE	1,1265%	2,4012%	2,3749%	0,0437%	0,0932%	0,0922%
17	CHARENTE- MARITIME	0,9413%	3,6368%	5,9596%	0,0284%	0,1098%	0,1799%
18	CHER	0,3791%	1,0675%	1,9758%	0,0716%	0,2015%	0,3730%
19	CORREZE	0,1736%	0,5799%		0,0137%	0,0459%	
21	COTE-D'OR	0,9137%	1,5366%		0,0000%	0,0000%	
22	COTES-D'ARMOR	0,0000%	0,0000%		0,0000%	0,0000%	
23	CREUSE	0,0507%			0,0000%		
24	DORDOGNE	0,9108%	2,5065%	3,9269%	0,2520%	0,6935%	1,0865%
25	DOUBS	0,0626%	0,2091%		0,0000%	0,0000%	
26	DROME	0,0517%	0,2211%	0,4081%	0,0017%	0,0073%	0,0136%
27	EURE	0,0145%	0,0852%	0,2163%	0,0062%	0,0364%	0,0924%
28	EURE-ET-LOIR	0,2477%	0,4100%	3,4406%	0,0491%	0,0812%	0,6817%
29	FINISTERE	0,0000%	0,0000%		0,0000%	0,0000%	
2A	CORSE-DU-SUD	0,0000%			0,0000%		
2B	HAUTE-CORSE	0,0000%	0,0000%		0,0000%	0,0000%	
30	GARD	0,0460%	0,6106%	0,4437%	0,0115%	0,1523%	0,1107%
31	HAUTE-GARONNE	3,8904%	12,3496%		0,3349%	1,0632%	
32	GERS	1,4245%	2,7993%		0,4246%	0,8344%	
33	GIRONDE	1,3412%	2,0210%	3,1588%	0,1058%	0,1594%	0,2492%
34	HERAULT	0,3945%	2,1363%	4,4849%	0,1176%	0,6369%	1,3370%
35	ILLE-ET-VILAINE	0,0805%	0,2687%		0,0521%	0,1741%	

Département		Année 2003			Période 1989 - 2002		
INSEE	NOM	Pourcent age MI sinistrées Aléa Faible	Pourcent age MI sinistrées Aléa moyen	Pourcent age MI sinistrées Aléa fort	Pourcent age MI sinistrées Aléa faible	Pourcent age MI sinistrées Aléa moyen	Pourcent age MI sinistrées Aléa fort
36	INDRE	0,1310%	0,3866%	0,2216%	0,1215%	0,3588%	0,2056%
37	INDRE-ET-LOIRE	0,1457%	1,0768%	0,9751%	0,0426%	0,3153%	0,2855%
38	ISERE	0,0074%	0,0247%		0,0000%	0,0000%	
39	JURA	0,5307%	0,8014%		0,0073%	0,0110%	
40	LANDES	0,0540%	0,2959%		0,0039%	0,0216%	
41	LOIR-ET-CHER	0,3089%	0,6759%	1,0469%	0,1020%	0,2232%	0,3456%
42	LOIRE	0,3026%	1,0106%		0,0000%	0,0000%	
43	HAUTE-LOIRE	0,7037%	2,3503%		0,0000%	0,0000%	
44	LOIRE-ATLANTIQUE	0,0728%	0,2431%		0,0279%	0,0933%	
45	LOIRET	0,2375%	0,4414%	0,6159%	0,2636%	0,4900%	0,6838%
46	LOT	0,3813%	2,3651%		0,0159%	0,0987%	
47	LOT-ET-GARONNE	1,1685%	4,8864%	0,0000%	0,1163%	0,4864%	0,0000%
48	LOZERE	0,1150%	0,3840%		0,0000%	0,0000%	
49	MAINE-ET-LOIRE	0,2797%	2,3616%	1,7481%	0,0195%	0,1646%	0,1218%
50	MANCHE	0,0014%	0,0047%		0,0000%	0,0000%	
51	MARNE	0,1193%	0,1057%	1,2249%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
52	HAUTE-MARNE	0,1457%	0,2344%	1,4281%	0,0033%	0,0053%	0,0323%
53	MAYENNE	0,0636%	0,2125%		0,0000%	0,0000%	
54	MEURTHE-ET-MOSELLE	1,3491%	3,7292%		0,0399%	0,1103%	
55	MEUSE	0,0849%	0,5648%	0,3877%	0,0011%	0,0075%	0,0051%
56	MORBIHAN	0,0448%	0,1495%		0,0000%	0,0000%	
57	MOSELLE	1,2069%	4,0309%		0,0976%	0,3261%	
58	NIEVRE	0,4261%	0,9989%		0,0214%	0,0501%	
59	NORD	0,0333%	0,1789%	0,1917%	0,0395%	0,2118%	0,2270%
60	OISE	0,0350%	0,1168%	0,1732%	0,0282%	0,0942%	0,1396%
61	ORNE	0,0150%	0,0501%	0,0743%	0,0322%	0,1075%	0,1593%
62	PAS-DE-CALAIS	0,0705%	0,2970%	0,5635%	0,0326%	0,1375%	0,2609%
63	PUY-DE-DOME	0,3501%	0,4147%	0,2994%	0,8123%	0,9622%	0,6946%
64	PYRENEES-ATLANTIQUES	0,2499%	2,1078%	1,0468%	0,0236%	0,1995%	0,0991%
65	HAUTES-PYRENEES	0,3934%	3,5385%		0,0306%	0,2752%	
66	PYRENEES-ORIENTALES	0,0843%	0,2817%		0,0517%	0,1727%	
67	BAS-RHIN	0,0845%	0,2823%		0,0000%	0,0000%	
68	HAUT-RHIN	0,0226%	0,0755%		0,0000%	0,0000%	
69	RHONE	0,4413%	1,4107%		0,0033%	0,0105%	
70	HAUTE-SAONE	0,2726%	0,9103%		0,0000%	0,0000%	
71	SAONE-ET-LOIRE	0,9995%	2,1966%		0,0025%	0,0056%	

Département		Année 2003			Période 1989 - 2002		
INSEE	NOM	Pourcent age MI sinistrées Aléa Faible	Pourcent age MI sinistrées Aléa moyen	Pourcent age MI sinistrées Aléa fort	Pourcent age MI sinistrées Aléa faible	Pourcent age MI sinistrées Aléa moyen	Pourcent age MI sinistrées Aléa fort
72	SARTHE	0,3887%	0,8079%	1,7331%	0,0224%	0,0466%	0,1000%
73	SAVOIE	0,0151%	0,0503%		0,0000%	0,0000%	
74	HAUTE-SAVOIE	0,0112%	0,0375%		0,0000%	0,0000%	
75	PARIS						
76	SEINE-MARITIME	0,0012%	0,0041%	0,0061%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
77	SEINE-ET-MARNE	2,0267%	5,0233%	8,1366%	0,3075%	0,7622%	1,2345%
78	YVELINES	0,6311%	3,3206%	2,0055%	0,4287%	2,2555%	1,3622%
79	DEUX-SEVRES	0,8377%	3,4994%	5,7825%	0,0218%	0,0911%	0,1506%
80	SOMME	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
81	TARN	3,7194%	7,8625%		0,3803%	0,8039%	
82	TARN-ET-GARONNE	1,3613%	5,1530%		0,5422%	2,0523%	
83	VAR	0,4751%	2,1608%		0,0961%	0,4372%	
84	VAUCLUSE	0,3006%	1,7827%	7,8682%	0,0556%	0,3295%	1,4541%
85	VENDEE	0,2401%	0,8019%		0,2049%	0,6845%	
86	VIENNE	1,4575%	6,3758%	6,6133%	0,0540%	0,2361%	0,2449%
87	HAUTE-VIENNE	0,5196%	1,7353%		0,0000%	0,0000%	
88	VOSGES	0,0603%	0,2012%		0,0199%	0,0663%	
89	YONNE	0,7600%	4,6423%	6,4481%	0,0383%	0,2337%	0,3247%
90	TERRITOIRE-DE-BELFORT	0,0578%	0,1929%		0,0000%	0,0000%	
91	ESSONNE	1,2946%	3,6151%	6,6418%	0,1939%	0,5414%	0,9948%
92	HAUTS-DE-SEINE	1,0860%	9,1207%	11,5458%	0,1278%	1,0729%	1,3582%
93	SEINE-SAINT-DENIS	1,8835%	2,9964%	10,4525%	0,3635%	0,5782%	2,0170%
94	VAL-DE-MARNE	0,6083%	2,6978%	5,7571%	0,3775%	1,6740%	3,5724%
95	VAL-D'OISE	0,0769%	0,3733%	0,5871%	0,0956%	0,4636%	0,7292%

Annexe 5

Taux d'accroissement moyen de la population entre 1990 et 1999 par départements (données INSEE)

INSEE	NOM DU DEPARTEMENT	TAUX
01	AIN	12,30%
02	AISNE	1,40%
03	ALLIER	2,30%
04	ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	18,20%
05	HAUTES-ALPES	27,50%
06	ALPES-MARITIMES	15,80%
07	ARDECHE	10,60%
08	ARDENNES	2,80%
09	ARIEGE	7,50%
10	AUBE	1,70%
11	AUDE	12,90%
12	AVEYRON	7,50%
13	BOUCHES-DU-RHONE	16,70%
14	CALVADOS	8,90%
15	CANTAL	6,70%
16	CHARENTE	4,10%
17	CHARENTE-MARITIME	12,40%
18	CHER	0,80%
19	CORREZE	9,20%
21	COTE-D'OR	6,10%
22	COTES-D'ARMOR	6,00%
23	CREUSE	1,90%
24	DORDOGNE	6,80%
25	DOUBS	14,20%
26	DROME	10,30%
27	EURE	7,10%
28	EURE-ET-LOIR	4,40%
29	FINISTERE	8,50%
2A	CORSE-DU-SUD	14,00%
2B	HAUTE-CORSE	12,70%
30	GARD	9,30%
31	HAUTE-GARONNE	17,00%
32	GERS	5,80%
33	GIRONDE	9,80%
34	HERAULT	21,10%
35	ILLE-ET-VILAINE	12,20%
36	INDRE	1,60%
37	INDRE-ET-LOIRE	8,70%
38	ISERE	12,60%
39	JURA	8,00%
40	LANDES	7,50%
41	LOIR-ET-CHER	4,60%
42	LOIRE	9,30%
43	HAUTE-LOIRE	9,30%
44	LOIRE-ATLANTIQUE	12,70%
45	LOIRET	6,90%
46	LOT	8,60%
47	LOT-ET-GARONNE	4,80%

INSEE	NOM DU DEPARTEMENT	TAUX
48	LOZERE	13,30%
49	MAINE-ET-LOIRE	8,80%
50	MANCHE	6,80%
51	MARNE	3,40%
52	HAUTE-MARNE	2,20%
53	MAYENNE	8,00%
54	MEURTHE-ET-MOSELLE	5,10%
55	MEUSE	1,70%
56	MORBIHAN	11,30%
57	MOSELLE	8,90%
58	NIEVRE	4,40%
59	NORD	1,20%
60	OISE	4,20%
61	ORNE	4,10%
62	PAS-DE-CALAIS	0,90%
63	PUY-DE-DOME	7,80%
64	PYRENEES-ATLANTIQUES	11,90%
65	HAUTES-PYRENEES	7,60%
66	PYRENEES-ORIENTALES	14,60%
67	BAS-RHIN	12,20%
68	HAUT-RHIN	13,10%
69	RHONE	9,10%
70	HAUTE-SAONE	4,50%
71	SAONE-ET-LOIRE	4,70%
72	SARTHE	5,40%
73	SAVOIE	17,70%
74	HAUTE-SAVOIE	18,20%
75	PARIS	9,90%
76	SEINE-MARITIME	6,00%
77	SEINE-ET-MARNE	10,40%
78	YVELINES	8,60%
79	DEUX-SEVRES	6,00%
80	SOMME	-0,30%
81	TARN	8,20%
82	TARN-ET-GARONNE	6,00%
83	VAR	17,40%
84	VAUCLUSE	10,80%
85	VENDEE	18,30%
86	VIENNE	7,80%
87	HAUTE-VIENNE	6,60%
88	VOSGES	7,10%
89	YONNE	3,70%
90	TERRITOIRE-DE-BELFORT	12,70%
91	ESSONNE	7,40%
92	HAUTS-DE-SEINE	-0,10%
93	SEINE-SAINT-DENIS	2,00%
94	VAL-DE-MARNE	3,50%
95	VAL-D'OISE	9,00%

Annexe 6

Détails sur la méthode de projection des coûts de l'adaptation (partie 5.3)

Cette annexe, qui complète le paragraphe 5.3, est consacrée à une analyse coûts-bénéfices (ACB) portant sur les techniques de prévention des retraits-gonflements d'argiles présentées dans le paragraphe 5.2.

L'objectif est de mettre en place un cadre de réflexion, permettant de comprendre dans quelle mesure ces dispositions à intégrer aux constructions neuves seront efficaces économiquement.

Méthode

Comment apprécier la pertinence économique de ces dispositions ? Dans l'absolu, il faut que le surcoût S engendré par les mesures de prévention soit supérieur au coût C de l'ensemble des sinistres, chaque sinistre ayant un coût unitaire c (on fait l'hypothèse que les désordres de seconde génération ne sont pas plus cher que ceux de première génération, pour des raisons de simplification des calculs).

Le surcoût S est payé l'année de la construction du bâtiment, année que nous prendrons comme étant 2009. Toutes les sommes évaluées seront ramenées, sauf précision contraire, en euros 2009. Le coût C est pris comme l'espérance des coûts liés aux sinistres à venir. En effet, chaque année à partir de la construction et jusqu'à la fin de la durée de vie D du bâtiment, il y a une probabilité annuelle p qu'un sinistre se produise. C est donc considéré comme la somme, sur D années, de la probabilité annuelle p par le coût unitaire de sinistre c . On a alors

$$C = D \cdot p \cdot c$$

Ce faisant, pour que la prévention soit intéressante d'un point de vue économique, il faut que S soit inférieur ou égal à C , donc que

$$S < D \cdot p \cdot c$$

Application et résultats

Dans le cadre de cette étude, on se penche sur le cas d'un pavillon, neuf, dépourvu de fondations adéquates pour résister aux retraits-gonflements d'argiles, dont la valeur de construction est estimée à 100 000 euros¹³. Les mesures de prévention des sinistres de type « retrait gonflement des argiles » sont évaluées à 8% du coût de la construction dans le cas du respect des dispositions globales, et 15% dans le cas de l'adaptation des fondations. Les surcoûts de prévention liés sont donc respectivement de $S_1 = 8000$ euros et $S_2 = 15\,000$ euros. Le coût d'un sinistre lié au retrait-gonflement des argiles sera lui pris égal à $c = 11\,700$ euros. On prendra une durée de vie $D = 30$ ans, en sachant que par construction, plus D est grand, plus la contrainte sur p est faible. Donc plus la maison est prévue pour durer, plus il sera intéressant de la protéger, toutes choses égales par ailleurs.

Le tableau qui suit synthétise la contrainte que p doit satisfaire pour que la prévention soit économiquement intéressante :

13 Ses autres caractéristiques sont données en page 51.

	Cas 1, dispositions globales	Cas 2, adaptation des fondations
p >	2,28%	4,27%

Illustration 29: Contraintes sur la probabilité "p" de sinistre, avec une valeur moyenne de sinistre de 10 000 euros

Or, la probabilité p, en dehors du cadre du changement climatique, peut être estimée en première approximation grâce aux travaux effectués sur la sinistralité « bruit de fond ». Ces données ne sont néanmoins valables qu'à une échelle très large, et uniquement en moyenne sur les zones ainsi définies. Le tableau qui suit synthétise les données de sinistralité par zone d'aléa (donc hors évènement de type sécheresse 2003¹⁴) :

Zone d'aléa	Faible	Modéré	Fort
Valeur de p	0,08%	0,37%	0,77%

Illustration 30: Probabilité annuelle de sinistre par zone sur une année "bruit de fond"

Il apparait donc clairement que la prévention par l'adaptation des fondations ou même la mise en place de mesures plus globales ne peut pas être justifié économiquement suivant les hypothèses explicitées plus haut. Par contre, si les travaux de reconnaissance de l'aléa permettent d'identifier une zone où la prévalence du risque est supérieure à 2,28%, voire à 4,27% (les Alpes de Haute-Provence, par exemple), alors la mesure devient globalement rentable pour la société dans cette zone précise. Ceci illustre l'intérêt de bénéficier d'un bon retour d'expérience sur la sinistralité.

Dans le cas où un sinistre serait estimé non pas à $c = 11\,700$ euros, mais à $c = 60\,000$ euros¹⁵, on aurait alors le tableau de contraintes sur p suivant :

	Cas 1, dispositions globales	Cas 2, adaptations des fondations
p >	0,44%	0,83%

Illustration 31: Contrainte sur la probabilité p de sinistre, avec une valeur moyenne de sinistre à 60 000 euros

Au vu de ces résultats, la mise en place des dispositions globales devient alors rentable sur l'ensemble des zones d'aléa modéré ou fort du territoire national, sans nécessité de discriminer plus avant. En se référant aux annexes pour discriminer d'autres zones, des départements par exemple, on peut ainsi comprendre l'intérêt

14 Prendre en compte les sécheresses de type 2003 revient à faire la somme des deux prévalences, sinistre bruit de fond et sinistre 2003, en pondérant par les probabilités respectives d'occurrence. On fait ici l'hypothèse d'une fréquence de 1/100 de la sécheresse 2003, qui ne joue alors que très à la marge sur la prévalence finale.

15 En se référant au coût moyen calculé par le RLPC en Ile-de-France.

d'une gestion territorialisée du risque de retrait-gonflement des argiles, ainsi qu'elle est actuellement pratiquée par le MEEDDAT.

En partant sur les mêmes hypothèses d'évolution du changement climatique proposées précédemment dans le rapport, on imagine maintenant que la probabilité moyenne d'occurrence annuelle d'une sécheresse de type 2003 devienne par exemple 1/9 dans les trente années entre 2009 et 2039 (scénario B2 max).

Zone d'aléa	Faible	Modéré	Fort
Valeur de p	0,50%	2,14%	3,66%

Illustration 32: Probabilité annuelle de sinistre sur une année "type 2003"

Ceci vient alors modifier ainsi la sinistralité moyenne en calculant d'abord l'espérance de probabilité, telle que

$$p(\text{zone en moyenne}) = P(2003) \cdot p(\text{zone en 2003}) + P(\text{bruit de fond}) \cdot p(\text{zone en bruit de fond})$$

avec $P(2003) = 1/9$ et $P(\text{bruit de fond}) = 8/9$.

On obtient ainsi le tableau suivant, qui fait par zone la somme des probabilités, pondérées par leur probabilité d'occurrence (bruit de fond ou type 2003) :

Zone d'aléa	Faible	Modéré	Fort
Valeur de p	0,12%	0,53%	1,02%

Illustration 33: Probabilité moyenne de sinistre par zone

En sus des mêmes résultats que précédemment dans le cas d'un sinistre à $c = 60\,000$ euros pour les dispositions globales, on observe alors que l'approfondissement des fondations devient très pertinent économiquement parlant en zone d'aléa fort. Les paramètres sont donc assez sensibles et la durée de vie de la maison individuelle assez longue pour que le changement climatique vienne perturber les calculs initiaux.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service Aménagement et Risques Naturels
Unité Risques Mouvements de terrain
117, avenue de Luminy – BP 167
13276 Marseille Cedex 9
Tél. : 04 91 17 74 74