

# La pathologie des fondations superficielles

**Diagnostic, réparations et prévention**  
> Maisons individuelles et bâtiments assimilés

# **La pathologie des fondations superficielles**

Établissement public au service de l'innovation dans le bâtiment, le CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, exerce quatre activités clés : la recherche, l'expertise, l'évaluation, et la diffusion des connaissances, organisées pour répondre aux enjeux de la transition écologique et énergétique dans le monde de la construction. Son champ de compétences couvre les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans les quartiers et les villes.

Avec plus de 900 collaborateurs, ses filiales et ses réseaux de partenaires nationaux, européens et internationaux, le groupe CSTB est au service de l'ensemble des parties prenantes de la construction pour faire progresser la qualité et la sécurité des bâtiments.

L'Agence Qualité Construction (AQC) est une association loi 1901 regroupant toutes les organisations professionnelles de la construction autour d'une mission : la prévention des désordres et l'amélioration de la qualité de la construction. Elle conduit cette mission en observant l'évolution des désordres et des pathologies, en identifiant les signes de qualité, en accompagnant les professionnels dans le choix des produits, en rappelant les bonnes pratiques, et en les informant grâce à des plaquettes d'informations, guides pratiques, magazine bimestriel, site Internet.

---

Le présent guide ne se substitue en aucun cas aux textes de référence, qu'ils soient réglementaires (lois, décrets, arrêtés...), normatifs (normes, DTU ou règles de calcul) ou codificatifs (Avis Techniques, « CPT »...) qui doivent être consultés.

Le CSTB décline toute responsabilité quant aux conséquences directes ou indirectes de toute nature qui pourraient résulter de toute interprétation erronée du contenu du présent guide.

---

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille, 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1<sup>er</sup> juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

GUIDE PATHOLOGIES DES BÂTIMENTS

# **La pathologie des fondations superficielles**

Diagnostic, réparations et prévention

Alain-Franck Béchade

**CSTB**  
ÉDITIONS

**Couverture** : Alain-Franck BÉCHADE

**Illustrations** : Michel GASNIER

Dominique LIZAMBARD (p. 9, p. 47, p. 141, p. 221, p. 265)

**Photographies** : Alain-Franck BÉCHADE

- © Alliance BTP : figures 43, 44, 46 et 47 Partie IV
- © BRGM : figures 37 à 45 et 48 Partie I
- © Cerema - Direction territoriale Normandie centre -  
Laboratoire régional de Blois : figure 13 Partie I  
et figure 24 Annexe B
- © CETE MISS : figure 70 Partie V
- © CNPF : tableaux 2 à 4 Annexe B
- © I2M - Université de Bordeaux, site de Pessac :  
figures 14 et 16 Partie V + figure 18 Annexe B
- © Soltechnic Aquitaine : figure 74 Partie IV
- © TEMSOL : figure 79 Partie IV
- © URETEK France : figures 67 à 69 Partie IV

**Remerciements :**

Alain-Franck Béchade dédie cet ouvrage à Sarah et souhaite remercier tout particulièrement Agathe, Brigitte, Cécile, Isabelle, Marion, Myriam, Odile, Valérie, Antoine, Didier, Frédéric, François, Marc, Maurice, Michel, Olivier, Patrice, Sébastien et Richard pour leur précieuse collaboration.

L'Agence Qualité Construction souhaite remercier tout particulièrement les professionnels réunis au sein de l'AQC qui ont participé à la relecture du présent ouvrage : Maurice ARMAND (UMF), Patrice BEAUFORT (Capeb), Anne-Marie BECKER (FFACB), Luis Manuel CARPINTEIRO (Coprec Construction), Ménad CHENAF (CSTB), François ESTRADÉ (Compagnie des experts), Fabien GUEGAN (UCI.FFB), Frédéric HENRY (AQC), Marc LEREAU (DHUP), Guy MORIVAL (Cequami), Emmanuelle PLAT (BRGM), Virginie POTIRON (INC), Paul SAUVAGE (Cerib), Didier VALEM (FFB).

# Sommaire

<b>Avant-propos .....</b>	<b>7</b>	<b>Partie III</b>	
<b>Partie I</b>		<b>Conduite du diagnostic :</b>	
<b>Notions de base.....</b>	<b>9</b>	<b>éléments méthodologiques .....</b>	<b>143</b>
1. Vocabulaire .....	11	1. Avant la première visite des lieux.....	145
2. Fondations superficielles .....	12	1.1 Renseignements généraux	
3. Cycle de l'eau .....	16	et recherche documentaire .....	145
4. Les sols.....	19	1.2 Situation du terrain.....	146
4.1 Constitution des sols.....	19	2. Les cinq premiers constats .....	149
4.2 Classification des sols.....	20	2.1 Observation de la structure.....	149
4.3 Les argiles.....	23	2.2 Observation du sol.....	155
5. Interactions sol-structure .....	28	2.3 Observation de l'environnement.....	156
5.1 Contraintes dues au poids propre du sol.....	28	2.4 Observation des ouvrages annexes .....	159
5.2 Contraintes dues aux surcharges		2.5 Observation des dommages	
d'une construction .....	28	et des fissures.....	163
6. La sécheresse : une définition relative .....	31	3. Investigations et analyse des faits.....	169
7. Assurance dommages ouvrage,		3.1 Investigations de bon sens.....	169
catastrophe naturelle et sinistralité .....	34	3.2 Les investigations approfondies.....	207
8. État des lieux de la prévention.....	38	4. Diagnostic final :	
8.1 Cartographie de l'aléa retrait-gonflement		<b>une analyse des risques .....</b>	<b>219</b>
des argiles du BRGM.....	38	4.1 Facteurs de prédisposition	
8.2 Plan de prévention des risques naturels		et facteurs déclenchants-incidents.....	219
prévisibles relatif au retrait-gonflement		4.2 Indices .....	221
des argiles (PPRn-RGA) .....	42	4.3 Analyse des risques identifiés .....	221
8.3 Mesures de prévention :		4.4 Retour d'expérience de l'expertise	
un bilan contrasté.....	44	sur plus de 250 sinistres .....	222
<b>Partie II</b>		<b>Partie IV</b>	
<b>La pathologie à toutes</b>		<b>Les travaux courants de reprise de sinistre.....</b>	<b>223</b>
<b>les étapes de la construction : études de cas.....</b>	<b>47</b>	1. Mesures conservatoires de bon sens .....	225
1. Étape 1 : la pathologie lors		1.1 Entretien des ouvrages .....	227
de la viabilisation du terrain		1.2 Précautions à prendre	
par le lotisseur .....	51	en présence d'un puits.....	227
2. Étape 2 : la pathologie		1.3 Élagage .....	227
avant la construction.....	65	1.4 Maîtriser les teneurs en eau	
3. Étape 3 : la pathologie au cours		en terrain argileux .....	228
du chantier .....	103	2. Mesures complémentaires :	
4. Étape 4 : la pathologie		<b>dispositions constructives.....</b>	<b>232</b>
après la réception .....	122	2.1 Trottoir en béton .....	232
5. Étape 5 : pathologie après		2.2 Drain de surface complémentaire	
les prescriptions du PPRn-RGA		au trottoir .....	233
sur la commune.....	128	2.3 Effectuer une tranchée drainante.....	235
6. Étape 6 : les sinistres		2.4 Supprimer les circulations d'eau	
de deuxième génération .....	131	dans les tranchées de raccordement .....	236
		2.5 Implanter un écran antiracine.....	237
		2.6 Recours à une géomembrane .....	239
		2.7 Écran antiracine couplé à une membrane	
		anti-évaporation .....	242

3.	<b>Renforcement de la structure</b> .....	243	5.	<b>La structure</b> .....	290
3.1	Rigidification des fondations par longrine .	244	5.1	Ce qu'il ne faut pas faire (en images) .....	290
3.2	Création ou renforcement de chaînages verticaux et horizontaux .....	246	5.2	Ferraillages des ouvrages en béton armé..	292
3.3	Reprise des efforts de traction par création de tirants .....	246	5.3	Constructions en limite de propriété .....	299
4.	<b>Confortement de sol par injections de coulis de ciment ou de microciment</b> ....	247	5.4	Rigidification des structures sur sols à risque.....	305
4.1	Brochage des dallages.....	247	5.5	Sous-sol partiel.....	307
4.2	Confortement de dallage par injections de coulis de ciment.....	249	6.	<b>Environnement : mesures à adopter pour maîtriser l'environnement des constructions</b> .....	309
4.3	Confortement d'assise de semelles de fondation par injections de coulis de ciment.....	251	6.1	Dispositions interdites en terrain argileux .....	310
5.	<b>Confortement et relevage par injections de résine plus ou moins expansive</b> .....	253	6.2	Gestion des eaux durant le chantier .....	312
5.1	Reprise des dallages .....	254	6.3	Raccordement des réseaux d'eaux pluviales.....	314
5.2	Reprise des fondations.....	255	6.4	Étanchéité des canalisations de réseaux enterrés.....	315
6.	<b>Report des charges en profondeur</b> .....	257	6.5	Drainage des eaux superficielles.....	315
6.1	Approfondissement des fondations.....	257	6.6	Drainage des eaux profondes des terrains en pente par une tranchée drainante .....	318
6.2	Reprise en sous-œuvre semi-profonde par puits .....	258	6.7	Capter les eaux provenant des fourreaux de raccordement aux compteurs.....	319
6.3	Reprise en sous-œuvre par micropieux .....	259	6.8	Végétation et constructions .....	320
6.4	Relevage des dallages et des structures par vérinage après réalisation des micropieux.....	264	6.9	Remblais autour des constructions .....	327
7.	<b>Reprise des conséquences dommageables</b> .....	265	7.	<b>Mesure compensatoire pour la protection du sol d'assise des variations de teneur en eau</b> .....	328
8.	<b>Choix des travaux de reprise</b> .....	266	8.	<b>Travaux réservés et risques associés : le devoir de conseil au client</b> .....	330
<b>Partie V</b>			9.	<b>Entretien des ouvrages</b> .....	331
<b>Concevoir et réaliser des constructions pérennes</b> .....			<b>Conclusion</b> .....		<b>333</b>
1.	Où sont passés les « fondements » d'antan ?.....	269	<b>Annexe A</b>		
2.	Identification des facteurs de risque .....	272	<b>Proposition de choix constructifs en fonction de l'analyse des risques géotechniques, structure et environnement</b> .....		
2.1	Étude documentaire.....	272	<b>335</b>		
2.2	Visite de terrain .....	275	<b>Annexe B</b>		
2.3	Analyse des risques.....	275	<b>Argiles, végétation et hydrotropisme</b> .....		
3.	Mesures de conception et de maîtrise de l'environnement selon le règlement d'application du PPRn-RGA.....	277	<b>347</b>		
4.	Facteurs de prédisposition liés au sol .....	281			
4.1	Dessouchage.....	281			
4.2	Portance .....	283			
4.3	RGA et hétérogénéité des sols d'assise.....	284			
4.4	Terrain en pente .....	285			

# Avant-propos

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et l'Agence Qualité Construction (AQC) ont eu l'idée de créer une collection d'ouvrages très concrets et illustrés sur la prévention des pathologies des bâtiments.

À partir d'études de cas issues de son expérience, l'auteur s'attache à présenter les points sensibles de la réglementation et de la normalisation, les bonnes pratiques, ainsi que les Règles de l'art, qui permettent d'éviter les désordres et de réaliser des constructions pérennes :

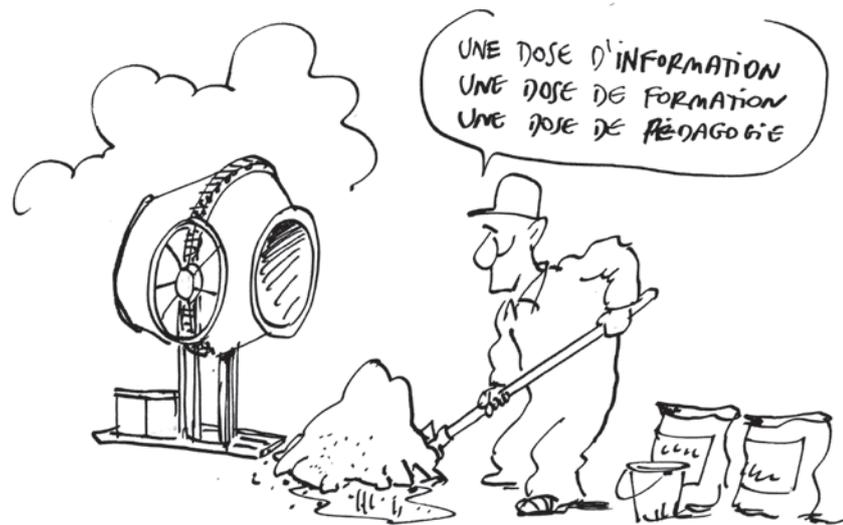
- les terrains hétérogènes,
- le retrait gonflement des argiles,
- les investigations,
- les pathologies issues de la phase chantier
- l'impact sur les fondations et la structure.
- les bonnes pratiques constructives, etc.

Utile aux professionnels et aux praticiens, cette collection est d'autant plus nécessaire que la problématique des pathologies de fondations est peu enseignée en tant que telle, ce qui rend d'autant plus précieux cet exposé clair, accessible et complet.

L'expertise technique du CSTB et la compétence pratique de l'AQC permettront à la collection d'atteindre son objectif : contribuer à l'amélioration de la qualité et à la diminution de la sinistralité.

# PARTIE I

## Notions de base



## 1. Vocabulaire

La photo ci-dessous (fig. 1) est celle d'une maison en construction à trois niveaux : un sous-sol général semi-enterré, un rez-de-chaussée où se situe la zone jour avec séjour, cuisine et suite parentale et un étage où s'agencent les autres chambres. Elle permet de visualiser les termes de base de toute construction qui seront rencontrés tout au long de cet ouvrage.



Figure 1 : Le vocabulaire utilisé dans la construction

- 1 : fondations superficielles par semelles filantes
- 2 : murs du sous-sol semi-enterré en parpaings (blocs en béton pleins allégés)
- 3 : plancher bas du sous-sol par dallage sur terre-plein, assis sur une forme sous dallage (hérisson)
- 4 : planchers hauts du sous-sol et rez-de-chaussée par plancher poutrelles et hourdis (entrevous béton)
- 5 : murs des élévations du rez-de-chaussée et de l'étage en briques à coller
- 6 : chaînages verticaux dans les angles
- 7 : chaînages verticaux multi-angles à 135° de part et d'autre du porche d'entrée
- 8 : chaînages verticaux en béton pour le parasismique placés en renforts verticaux sur toute l'épaisseur des murs autour de la baie vitrée du séjour et l'entrée du garage
- 9 : coffres de volets roulants en terre cuite surmontés d'un linteau en béton
- 10 : linteau tout en béton du porche de l'entrée, support du mur de l'étage
- 11 : planelles en béton et en briques pour le coffrage des chaînages horizontaux et des planchers hauts du sous-sol et du rez-de-chaussée

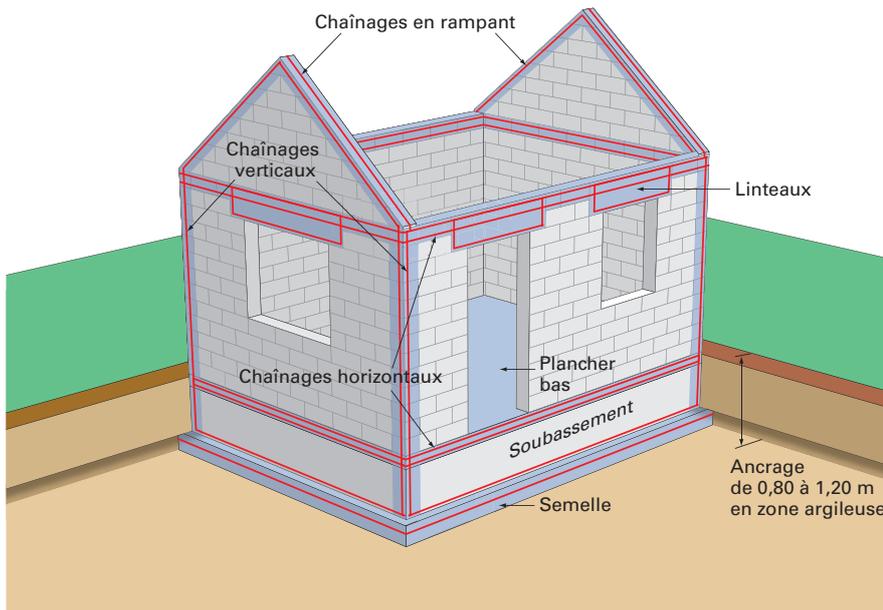


Figure 2 : Schéma d'une structure de maison individuelle

## 2. Fondations superficielles

Une fondation superficielle est chargée de transmettre au sol les charges descendantes du poids propre de la structure (murs, charpente, équipements), les charges d'exploitation et celles inhérentes aux actions de la neige et du vent.

Le DTU 13.11 qualifie de « superficielles » les fondations en béton armé dont le rapport de la largeur ( $B_m$ ) sur la hauteur ( $D_m$ ) est supérieur à  $1/6^e$  et dont la profondeur d'ancrage ( $D_m$ ) est inférieure à 3 m. Au-delà d'un rapport de  $1/6^e$  et si la profondeur excède 3 m, la fondation est dite « profonde » et relève du DTU 13.2.

Les ouvrages traditionnels d'adaptation au sol superficiel sont les semelles isolées, les semelles filantes, les radiers généraux et les puits (massifs, semi-profonds ou plots courts). Les fondations superficielles des constructions d'un à trois niveaux sont, dans 95 % des cas, des semelles isolées ou filantes.

La pathologie des radiers et des puits semi-profonds n'est pas traitée dans cet ouvrage.

Les fondations superficielles sont calculées selon les préconisations du DTU 13.12, de l'Eurocode 2 et de l'Eurocode 7. L'ancrage de la fondation est défini par la plus grande des valeurs retenue parmi les facteurs ci-dessous :

- la profondeur du « bon sol » : il s'agit de transmettre les charges sur une couche de sol capable de supporter les charges apportées par la construction ;
- la mise hors gel : elle varie selon les régions, allant de 50 cm en Provence à 1,50 m en montagne ;

- la protection au retrait-gonflement des argiles (RGA) : elle est fonction de la profondeur du front de dessiccation (perte d'eau contenue dans le sol par la chaleur et par la succion).
- Cette profondeur dépend de plusieurs paramètres : la nature des sols (grenus ou fins), la sensibilité au retrait-gonflement des argiles, l'homogénéité des couches de sol, la localisation géographique de la construction, l'orientation de la façade (avec un risque accru pour les façades sud et ouest), la présence d'ouvrages périphériques de protection contre le RGA (trottoir, terrasse, géomembrane éventuelle) et, enfin, la durée de vie de la construction.

Le réchauffement climatique et la prévision de sécheresses de plus en plus marquées risquent fort d'imposer l'augmentation, à moyen terme, de la profondeur d'ancrage des semelles de fondation superficielle.

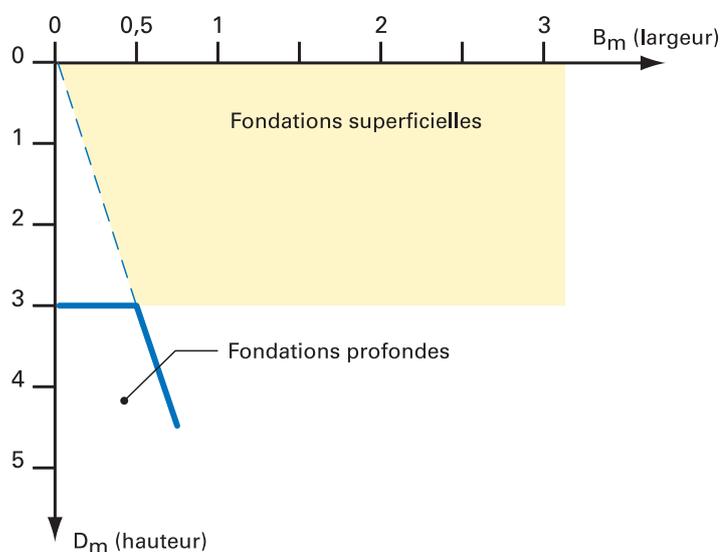


Figure 3 : Définition d'une fondation superficielle

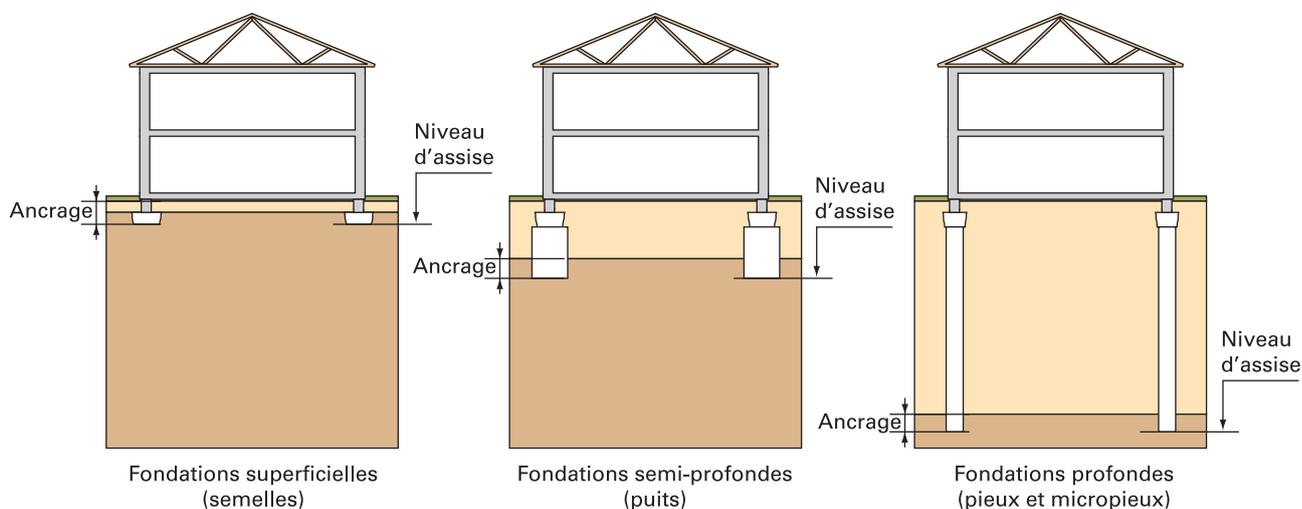


Figure 4 : Les différents types de fondation (en marron foncé, le niveau du « bon sol »)

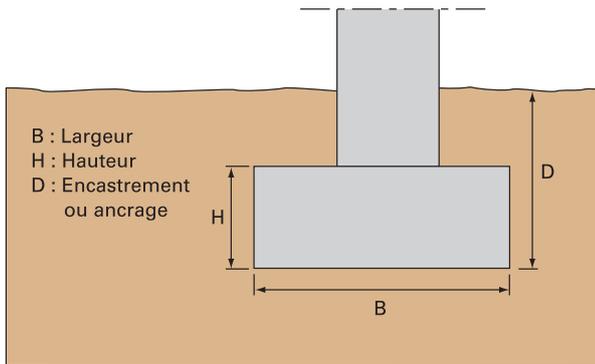


Figure 5 : Terminologie

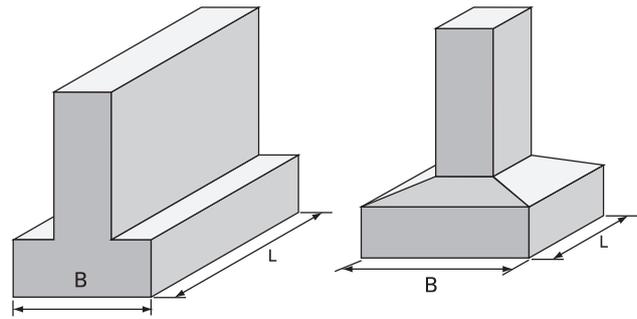


Figure 6 : Semelle filante (à gauche) et semelle isolée (à droite)

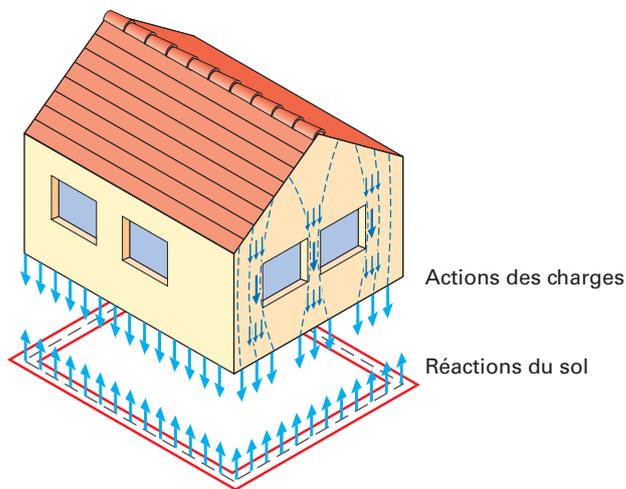


Figure 7 : Charges permanentes et charges d'exploitation transmises par les murs aux semelles de fondation

La semelle de fondation repose sur un béton de propreté qui, comme son nom l'indique, permet d'avoir un fond de fouille propre pour y poser et caler les armatures de la semelle de fondation. Le béton de propreté peut être remplacé par une feuille de polyane.

Lorsque le bon sol est plus profond (jusqu'à 2 m de profondeur), le maçon peut soit multiplier le nombre de rangs de parpaings, soit couler du gros béton en pleine fouille. Si le bon sol est à plus de 2 m de profondeur, il faut opter pour une assise avec des puits, des massifs et des longrines. Une étude de sol est indispensable pour caractériser la portance de la couche d'assise des puits.

Le plancher bas du rez-de-chaussée repose sur les murs de soubassement (ou libages), eux-mêmes reposant sur les semelles continues. Les libages sont constitués de parpaings creux, d'agglomérés de béton pleins allégés ou de blocs à bancher (cf. NF DTU 20.1 art. 7.4.2). Des éléments pleins doivent être utilisés s'il existe un risque prolongé d'accumulation d'eau. Les murs de soubassement sont revêtus d'un enduit hydrofuge. L'article 7.4.2 de la NF DTU 20.1 réglemente la conception de la partie enterrée des murs de soubassement selon trois catégories de locaux :

- catégorie 1, le mur borde des locaux nobles : aucune trace d'humidité n'est acceptée sur sa face intérieure. C'est le cas des murs limitant des locaux habitables en sous-sol ;
- catégorie 2, le mur borde des locaux pour lesquels l'étanchéité de la paroi n'est pas obligatoire : des infiltrations limitées peuvent être acceptées par le maître d'ouvrage. C'est le cas, en général, des murs bordant une chaufferie, un garage ou certaines caves ;
- catégorie 3, le mur ne doit assurer de fonction autre que la résistance mécanique : cette exigence conditionne l'épaisseur minimale de la paroi. C'est le cas, en général, des murs de vide sanitaire et des murs périphériques de terre-plein.

Le plancher bas est constitué d'une dalle pleine en béton armé, d'un plancher sur vide sanitaire ou d'un dallage sur terre-plein. Le dallage est fondé sur une forme compactée (aussi appelée « hérisson »). Le DTU 13.3 préconise la réception de la portance de la forme sous dallage (déformabilité et compacité du hérisson) par des essais à la plaque. Les murs en élévation sont des maçonneries d'agglomérés de béton (parpaings) et de briques.

Des ouvrages en béton armé, intégrés ou non dans les maçonneries, reprennent les efforts de traction, ceux au vent et ceux de flexion de reprise de charges (poutres, linteaux). Dans ce composite, la maçonnerie n'assure que le contreventement et la descente des charges de compression.

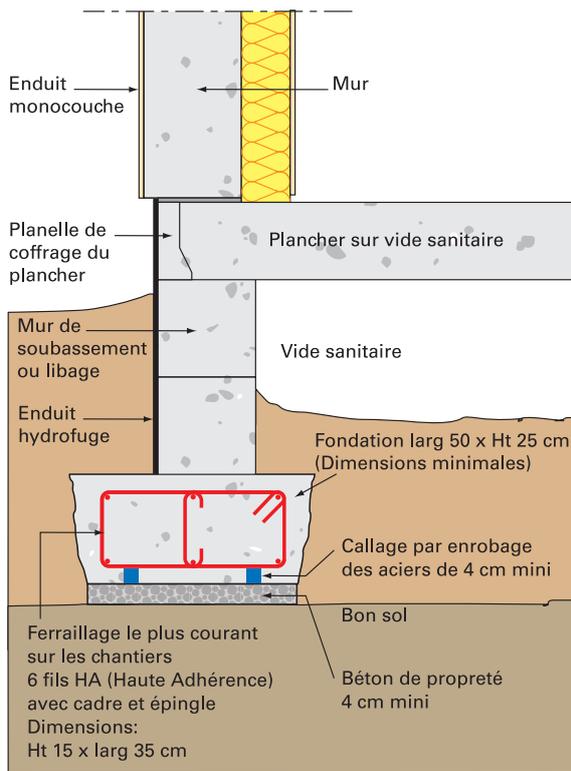


Figure 8 : Fondation superficielle courante

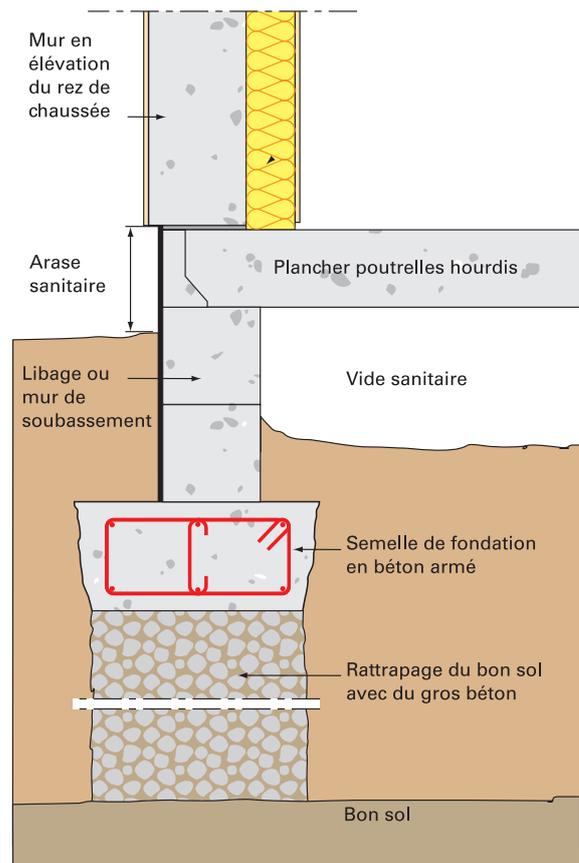


Figure 9 : Fondation superficielle avec rattrapage du « bon sol » avec du gros béton

### 3. Cycle de l'eau

Certaines étapes du cycle de l'eau peuvent être sinistrantes. Sous nos climats, l'apport d'eau au sol s'effectue sous forme de pluie, de neige, de rosée et de brouillard. Toute l'eau des précipitations n'atteint pas le sol. Une part est évaporée directement pendant et après la pluie et des gouttes sont interceptées par le feuillage des végétaux.

Arrivée au sol, l'eau ruisselle, s'infiltré et humidifie le sol. Comme ce dernier ne peut absorber le volume des fortes pluies et que le transfert vers la profondeur n'est pas aussi rapide que la tombée, la partie supérieure du sol sature, l'eau s'accumule en surface puis s'écoule selon la pente. C'est le ruissellement. Si la surface du sol est imperméable (terrain argileux, route ou zone urbanisée), le ruissellement apparaît immédiatement. Il est, en revanche, ralenti ou annulé par la végétation qui favorise l'infiltration.

L'évaporation du sol et la transpiration des végétaux réduisent la quantité d'eau s'infiltrant vers la nappe. En été, l'évapotranspiration reprend la totalité de l'eau qui a pénétré dans le sol. Les précipitations efficaces sont égales à la quantité d'eau arrivée au sol moins l'évapotranspiration réelle. Cette eau pénètre dans le sol et constitue la réserve utile.

Lorsque la capacité maximale de la réserve utile est atteinte, l'eau descend sous l'effet de la gravité dans le sol, humidifie les couches inférieures, puis atteint la nappe par infiltration. Ce phénomène, très lent, peut demander plusieurs mois. La nappe ne peut être alimentée que pendant les mois d'hiver.

L'eau est aussi soumise aux forces de gravité et de capillarité : à partir d'une certaine profondeur, la teneur en eau ne peut plus augmenter, l'air est chassé de tous les pores, l'espace entre les grains est rempli d'eau, le sol est alors saturé. Cette zone saturée forme une nappe où les forces de gravité sont prédominantes.

Les forces de capillarité entre les grains et la tension superficielle du film d'eau autour d'eux déterminent le potentiel de rétention d'eau de la matrice. La teneur en eau du sol est aussi fonction de sa porosité, de sa granulométrie, et de sa perméabilité. À 1 m de profondeur, les valeurs de réserve utile d'eau vont de 70 mm pour un sol sableux grossier à 200 mm pour un sol limono-argileux. Une couche est réputée imperméable lorsque la valeur K de perméabilité d'infiltration est de l'ordre de  $10^{-9}$  m/s (environ 1 m par an).

La transpiration et la dessiccation estivale extraient l'eau de la zone non saturée du sol, parfois de la zone saturée. Ce sont les tensions de succion. L'énergie nécessaire pour extraire l'eau est d'autant plus grande que le sol s'appauvrit en eau. L'extraction par les racines est possible jusqu'à une valeur limite de la teneur en eau. Au-delà, la plante ne peut plus vaincre la tension et satisfaire son besoin. Elle flétrit.

Pour les espèces hydrophiles (feuillus : peuplier, saule, frêne ; conifères : thuyas, par exemple), qui demandent de l'eau facile à absorber, la réserve utile doit être réapprovisionnée par ascension capillaire à partir d'une nappe. Les espèces xérophiles (feuillus : chêne, charme, albizzia ; conifères : pin, sapin, cèdre, thuyas), adaptées à la sécheresse, peuvent extraire l'eau pour des tensions de succion voisines du point de flétrissement.

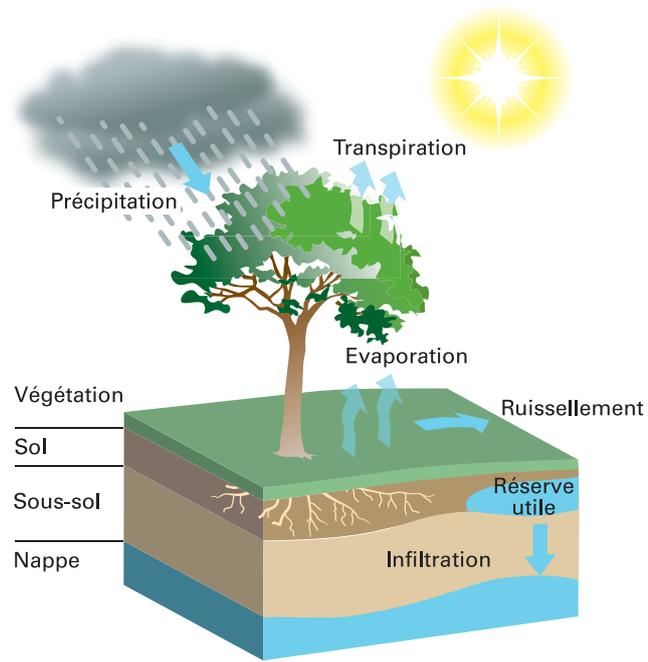


Figure 10 : Cycle de l'eau

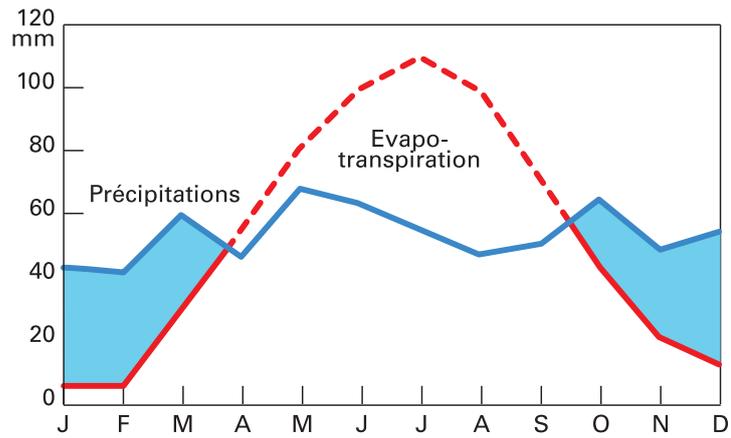


Figure 11 : Diagramme précipitations-évapotranspiration

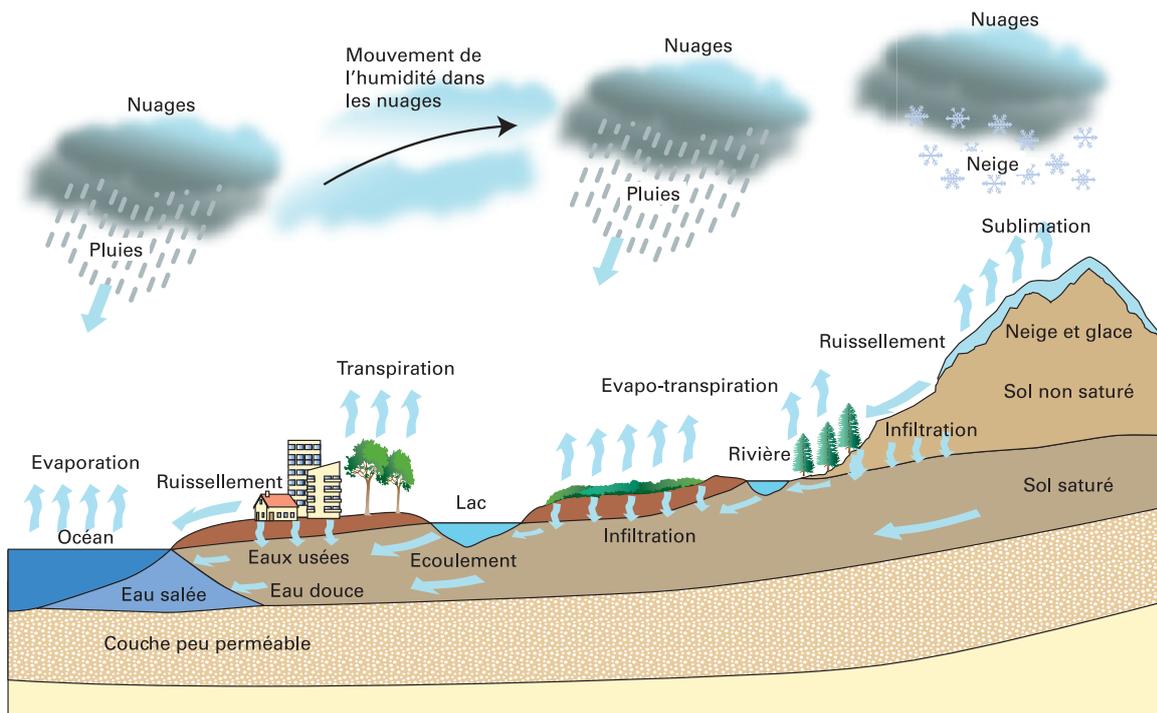


Figure 12 : Cycle de l'eau

**Courbes de rétention des sols "Argile raide bariolée + quelques passées sableuses", "Argile bariolée" et "Argile beige, raide"**

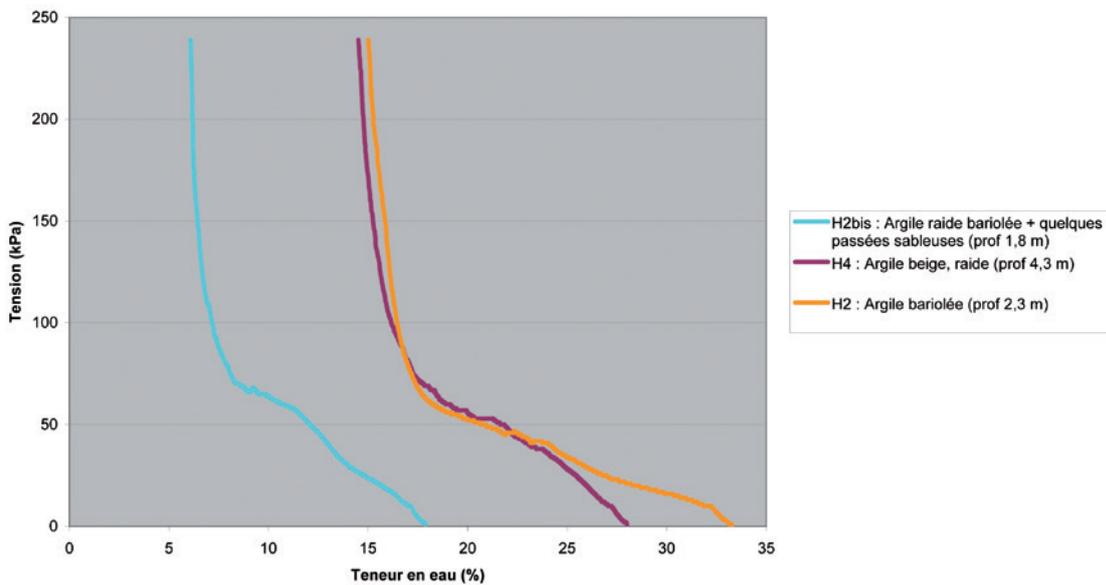


Figure 13 : Exemple de courbe d'étalonnage de sondes tensiométriques entre les valeurs de succion (kPa) et celle de teneur en eau massique en % dans des sols argileux ocre (site expérimental de Roaillan, en Gironde ; travaux CETE et I2M)

## 4. Les sols

Les matériaux qui constituent la surface de l'écorce terrestre sont classés en deux grandes catégories :

- les roches, qui sont des agglomérats de grains minéraux liés par une cohésion forte et permanente, même après immersion prolongée dans l'eau ;
- les sols, qui sont un mélange d'éléments solides, d'eau et de gaz ou d'air. Ils sont meubles, poreux et hétérogènes.

### 4.1 Constitution des sols

Les éléments constitutifs d'un sol (solide, air et eau) peuvent être stratifiés selon la figure 14 :

Volume		Poids	
V <sub>a</sub>	Air	W <sub>a</sub> = 0	
V <sub>w</sub>	Eau	W <sub>w</sub>	
V <sub>s</sub>	Grains solides	W <sub>s</sub>	

Figure 14 : Schéma de constitution d'un sol

#### 4.1.1 L'air

Le gaz contenu dans les vides est soit de l'air pour un sol sec, soit un mélange d'air et de vapeur d'eau pour un sol humide. Un sol est dit « saturé en eau » lorsque le volume d'air est égal à zéro.

#### 4.1.2 L'eau

Dans le sol, l'eau existe sous quatre formes différentes :

- l'eau libre : ou l'eau de la nappe phréatique qui donne le niveau d'eau dans un puits (niveau piézométrique). Elle se situe sous la limite supérieure de la nappe, dans la zone saturée. C'est une eau mobile sous l'effet du drainage gravitaire. La perméabilité d'un sol est fonction de la taille des pores ;
- l'eau capillaire : elle remplit les vides au-dessus de la zone saturée. Cette eau forme une frange de saturation mobile, montant et descendant au gré des variations du niveau de la nappe ;
- l'eau de rétention, pelliculaire et adsorbée : elle provient des propriétés électriques des molécules d'eau. Son pourcentage du volume total augmente en fonction de la granulométrie : de 2 à 5 % dans les sables grossiers, de 10 à 15 % dans les sables fins et de 40 à 50 % dans les argiles. Sa quantité est proportionnelle à la surface développée des grains, la « surface spécifique ». La couche d'eau de rétention joue un rôle de lubrifiant entre les grains. Son influence est considérable sur les propriétés mécaniques des sols ;

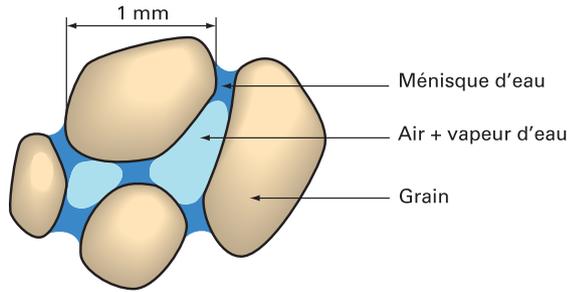


Figure 15 : Sol humide non saturé

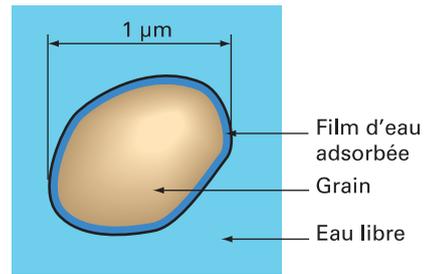


Figure 16 : Particule d'un sol saturé

- l'eau de constitution ou interfoliaire : elle se trouve entre les feuillets des argiles. Certaines argiles comme les montmorillonites (famille des smectites) admettent plusieurs couches de molécules d'eau, ce qui peut doubler l'épaisseur entre deux feuillets.

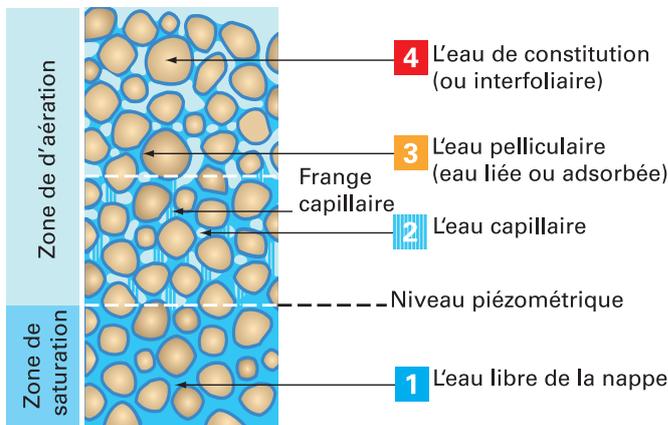


Figure 17 : Les différentes formes de l'eau dans un sol saturé et non saturé

## 4.2 Classification des sols

Le squelette solide du sol provient de l'érosion et de la désagrégation mécanique et/ou chimique de la roche mère. On distingue les minéraux pulvérulents d'une dimension de plus de 20  $\mu\text{m}$  ayant le même comportement que la roche mère, les limons de moins de 20  $\mu\text{m}$ , les minéraux argileux de moins de 2  $\mu\text{m}$  (kaolinite, illite et montmorillonite) et les sols organiques (vases et tourbes). Le Guide des terrassements routiers<sup>(1)</sup> et la norme qui en découle, la NF P 11-300 (1992), proposent la classification des matériaux suivante :

- classe A : sols fins ;
- classe B : sols sableux et graveleux avec fines ;
- classe C : sols comportant des fines et des gros éléments ;
- classe D : sols insensibles à l'eau.

Les paramètres physiques des sols varient en fonction de leur granularité, elle-même définie par le diamètre des particules.

### Attention

Ce classement n'a rien à voir avec celui figurant dans l'Eurocode 8 comportant les mêmes lettres vis-à-vis du risque sismique.

1. Guide GTR, « Réalisation des remblais et des couches de forme », LCPC, SETRA, 1992.

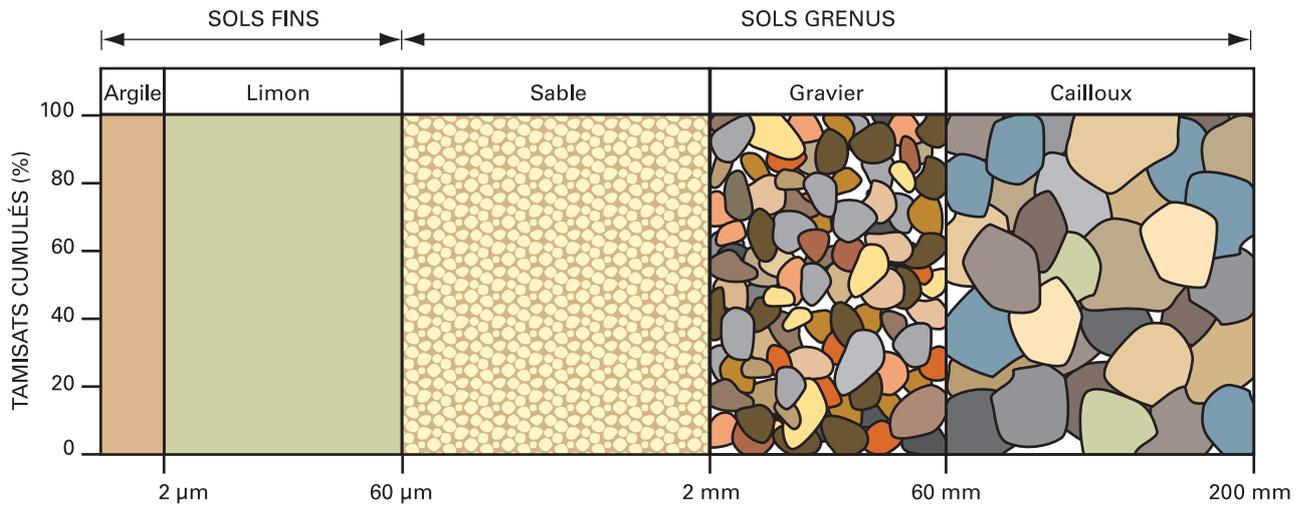


Figure 18 : Classement des grains en fonction de leurs dimensions, c'est-à-dire de leur granularité.

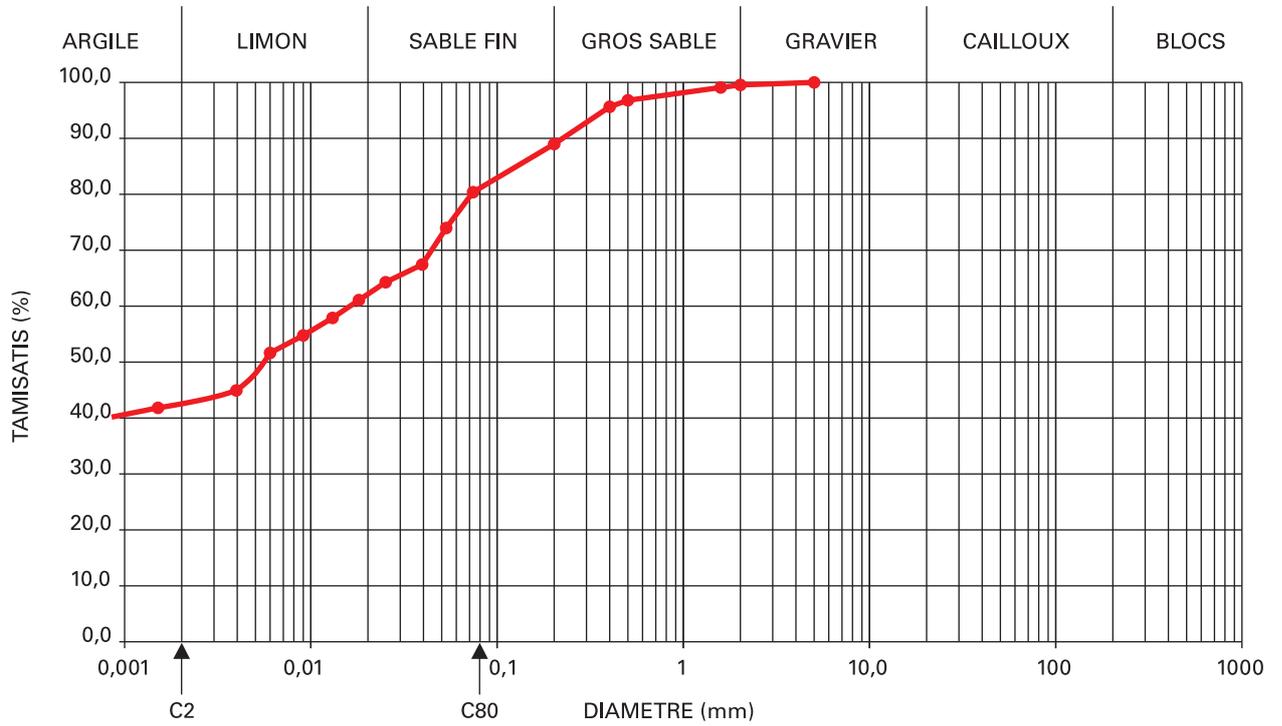


Figure 19 : Courbe granulométrique d'un sol argileux avec un passant à 2 µm (C2) de plus de 40 %

La figure 20 ci-dessous permet de déterminer à quelle classe et à quelle sous-classe appartient le matériau en fonction du diamètre du passant, puis, en se reportant au tableau 1, de connaître la nature du sol.

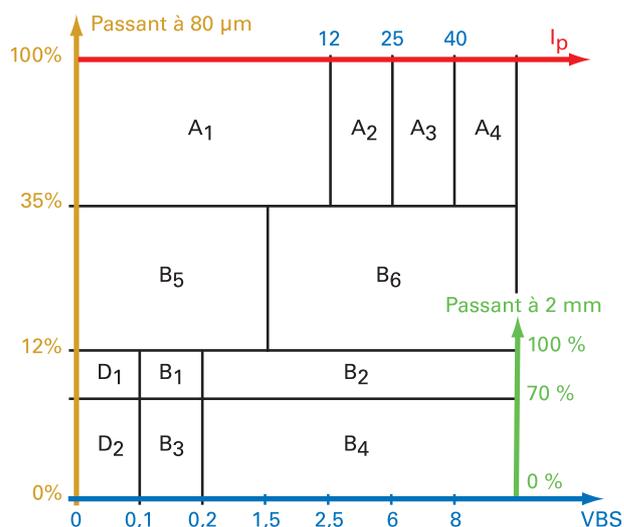


Figure 20 : Nature des matériaux en fonction des grandeurs de caractérisation (le passant)

Tableau 1 : Définition des sols en fonction de leur nature

Classe	Sous-classe	Nature
A Sols fins	A1	Limons peu plastiques, loëss, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques, etc.
	A2	Sables fins argileux, limons argileux et marnes peu plastiques, arènes, etc.
	A3	Argiles et argiles marneuses et limons très plastiques, etc.
	A4	Argiles et argiles marneuses très plastiques, etc.
B Sols sableux et graveleux avec fines	B1	Sables silteux, par exemple
	B2	Sables argileux (peu argileux), par exemple
	B3	Graves silteuses, par exemple
	B4	Graves argileuses (peu argileuses), par exemple
	B5	Sables et graves très silteux, etc.
	B6	Sables et graves argileux à très argileux

### 4.3 Les argiles

#### 4.3.1 Retrait-gonflement des argiles

Ces roches sédimentaires désignent à la fois une classe granulométrique et une nature minéralogique (les phyllosilicates). Les argiles se caractérisent par une structure en feuillets, entre lesquels vient se loger l'eau interfoliaire. L'acquisition et le départ de molécules d'eau caractérisent le mécanisme de retrait-gonflement.

Les phénomènes de retrait-gonflement s'expriment dans les minéraux argileux appartenant au groupe des smectites et, dans une moindre mesure, au groupe des interstratifiés. À cette échelle, la variation de teneur en eau dans le sol se traduit également par des variations de volume du matériau.

Par ailleurs, un sol est composé d'un ensemble d'éléments de tailles et de structures différentes. Sa teneur en eau influe particulièrement sur les caractéristiques des sols fins. Un sol argileux humide devient collant et plastique, alors qu'il est cassant, voire pulvérulent, à l'état sec.

Ces données expliquent pourquoi les argiles sont régulièrement liées aux pathologies des fondations superficielles.

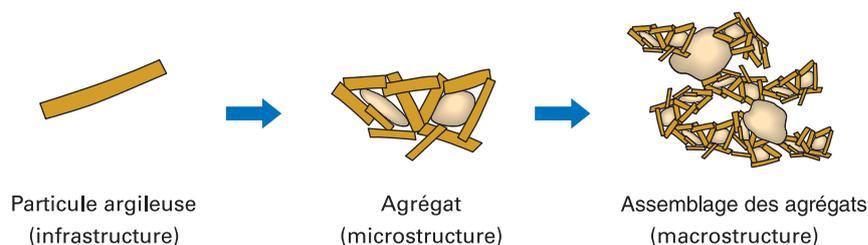


Figure 21 : De la particule d'argile à l'assemblage d'agrégats

#### 4.3.2 Caractéristiques intrinsèques des sols : activité, plasticité et portance

##### A. Coefficient d'activité des argiles

La valeur de bleu de méthylène (VBS) traduit la quantité et l'activité de la fraction argileuse. La capacité d'une argile à attirer l'eau est proportionnelle à ce que l'on appelle sa « surface spécifique » (en m<sup>2</sup>/g), qui correspond à la surface cumulée des feuillets d'argile pour une masse donnée. La VBS s'exprime en gramme de bleu pour cent grammes de sol. La classification de Magnan (1989) et de celle de Bedin (2004) introduisent le passant à deux micromètres (C2) pour déterminer le coefficient d'activité des argiles.

Tableau 2 : Comportement à l'eau de différentes argiles

Argile	Kaolinite	Illite	Smectite
Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)	10-45	80-100	700-900
Comportement à l'eau	Non gonflant	Peu gonflant	Gonflant

Tableau 3 : Activité des argiles selon la classification Magnan et Bedin

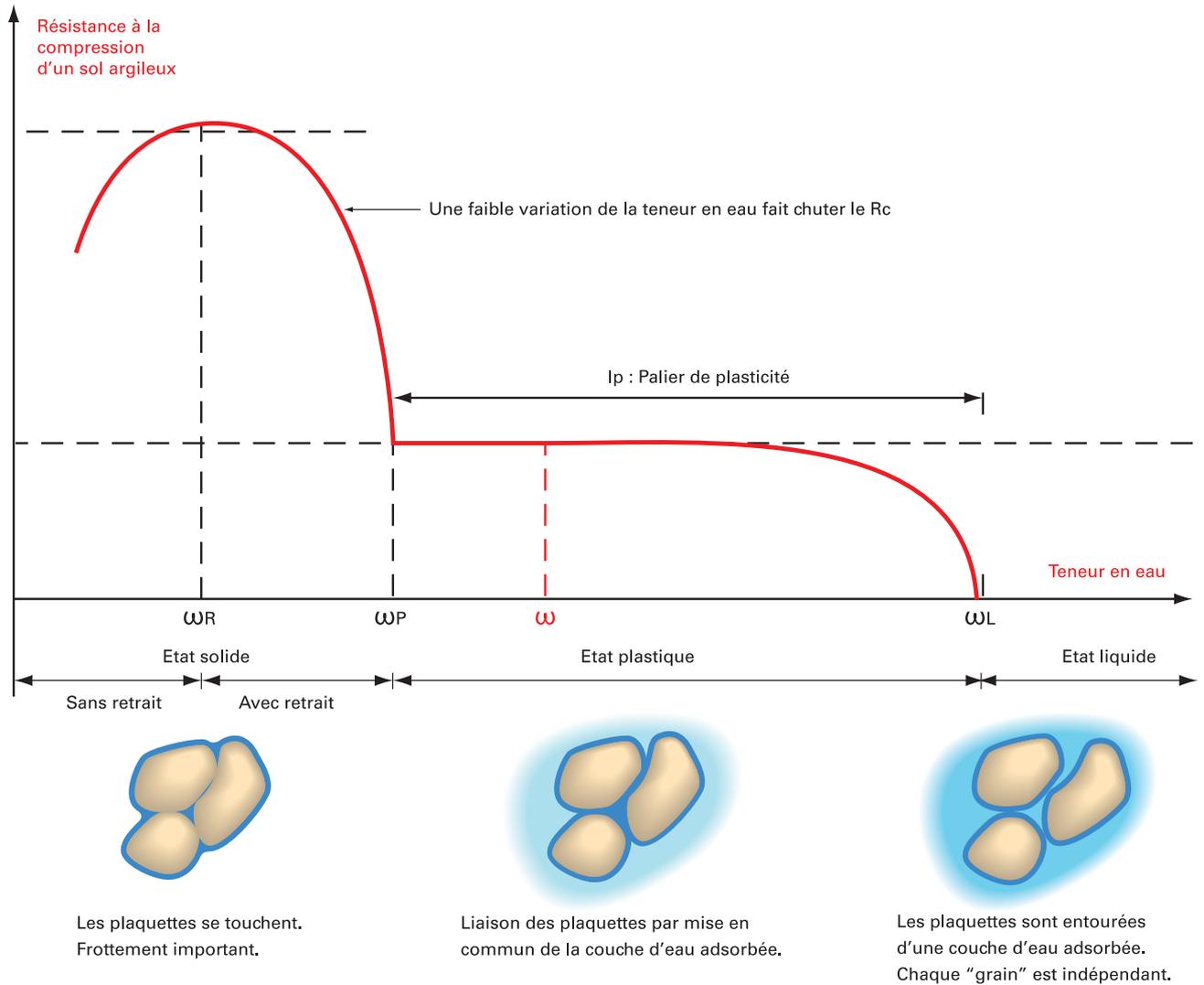
$A_{CB} = 100 VBS_s / C2$		
Classes	$A_{CB}$	Activité des argiles
7	Supérieur à 18	Nocives
6	13 à 18	Très actives
5	8 à 13	Actives
4	5 à 8	Normales
3	3 à 5	Peu actives
2	1 à 3	Inactives
1	Inférieur à 1	Sols non argileux

## B. Indice de plasticité

L'état de dessiccation d'un sol s'obtient en mesurant la teneur en eau : l'indice de plasticité issue des limites d'Atterberg (et précisé par Arthur Casagrande) met en évidence l'influence de la teneur en eau sur la consistance du matériau fin. Cet indice représente l'étendue du domaine plastique et donne une indication sur l'aptitude du matériau argileux à acquérir de l'eau. Plus le palier est important, plus l'argile est sensible au retrait-gonflement.

Tableau 4 : Valeurs indicatives des paramètres d'identification des sols susceptibles de variation de volume

Paramètres d'identification			Susceptibilité de variation de volume du sol
Indice de plasticité (%)	Pourcentage de passant au tamis de 80 $\mu\text{m}$	Valeur de bleu VBS (NF P 94-468)	
> 30	> 90 %	> 6	Forte
15 < Ip < 30	< 50 %	2 < VBS < 6	Moyenne
< 15	< 50 %	< 2	Faible



$w$  : teneur en eau du matériau  
 $w_l$  : limite de liquidité  
 $w_p$  : limite de plasticité  
 $w_r$  : limite de retrait  
 $I_p = w_l - w_p$   
 $I_c = (w_l - w) / I_p$  caractérise l'état de dessiccation du sol

Figure 22 : Plus le palier est important, plus l'argile est sensible au retrait gonflement

### Sensibilité à l'eau des sols d'origine molassiques

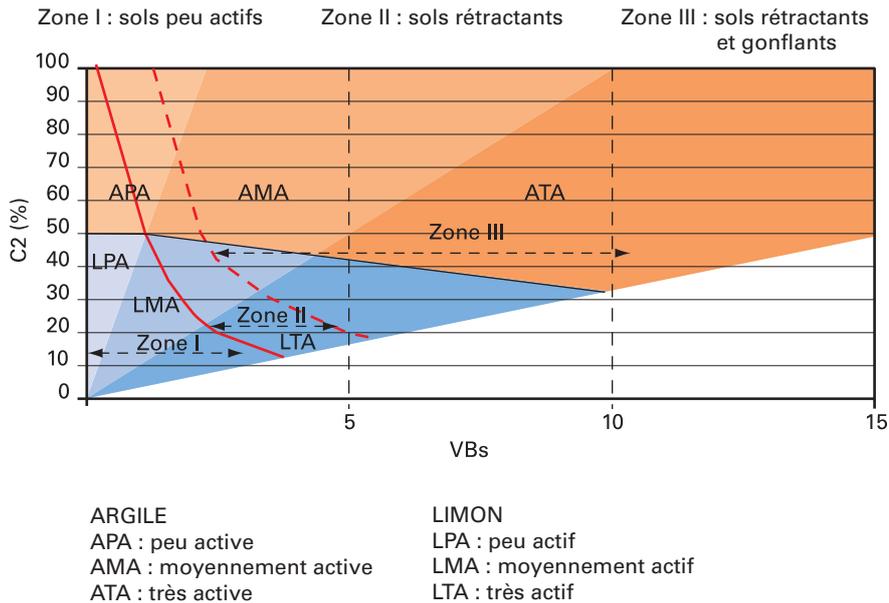


Figure 23 : Illustration de la classification de André Bedin (2004) : sensibilité à l'eau des sols d'origine molassique

### C. Retrait-gonflement et portance

La résistance à la compression influence directement la portance d'un sol argileux. Une faible augmentation de la teneur en eau fait chuter rapidement cette résistance.

Les argiles appartiennent aux sols les plus fins, imperméables et non drainants, qui deviennent plastiques en présence d'eau. Non saturés, les sols argileux possèdent une bonne portance et une cohésion suffisante pour supporter une construction. Dès que leur teneur en eau augmente, les argiles deviennent « plastiques ». Si la saturation augmente, leur consistance tend alors vers celle d'une pâte à modeler, puis d'une boue.

Les argiles se déforment sous charges et conservent cette déformation après le retour à la normale de leur teneur en eau.

À l'opposé, la dessiccation conduit ponctuellement au retrait de l'argile dont le volume diminue par expulsion d'eau (5 à 10 %), ce qui entraîne des pertes d'appuis ponctuelles des structures. Le retour d'eau, naturel ou accidentel, peut être tout aussi dangereux, avec un défaut de portance par plastification des argiles. Dessiccations et retours d'eau successifs engendrent des mouvements différentiels préjudiciables à la solidité des constructions, mouvements connus sous le nom de « retrait-gonflement des argiles » (RGA).

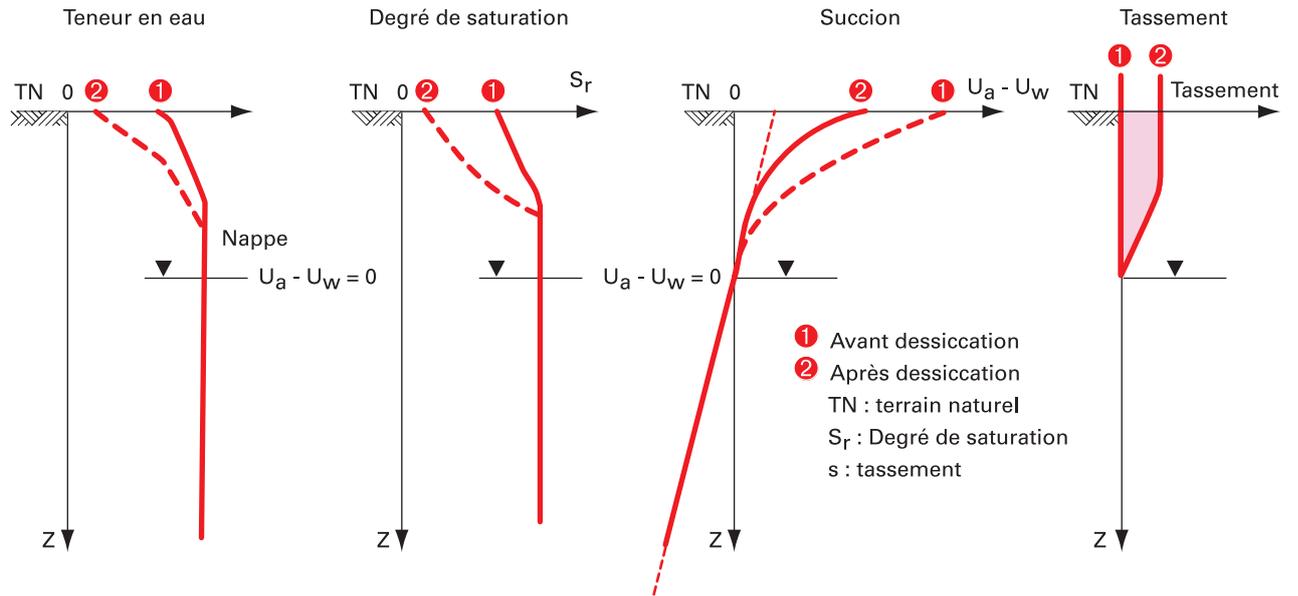


Figure 24 : Effet hydrique : dessiccation de surface et succion en fonction de l'état initial du sol et des charges appliquées.

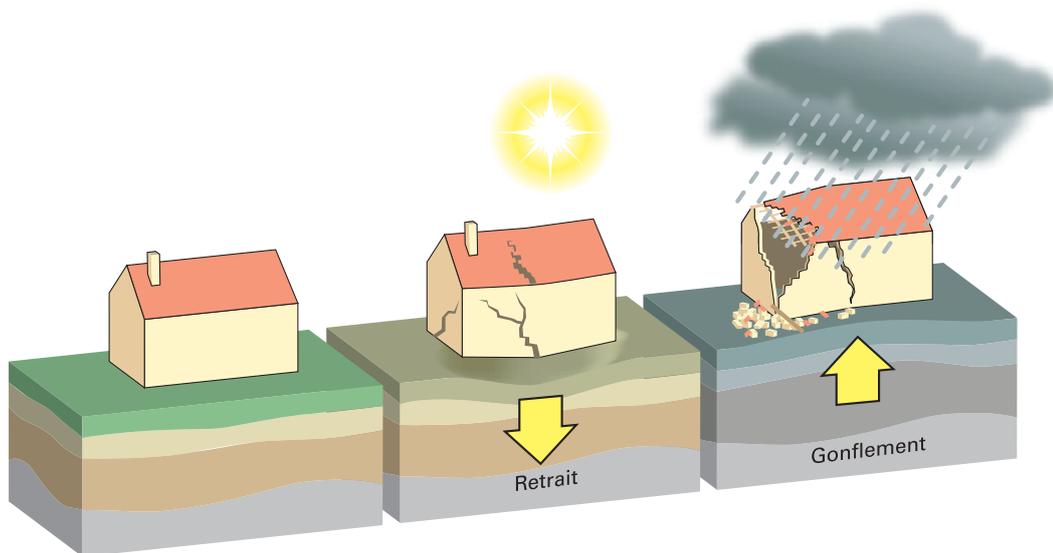


Figure 25 : Le retrait-gonflement des argiles (RGA) engendre des mouvements différentiels préjudiciables à la solidité des constructions.

## 5. Interactions sol-structure

### 5.1 Contraintes dues au poids propre du sol

Le poids du sol augmente avec la profondeur. La pression due au poids propre du sol exerce une contrainte verticale ( $\sigma_v$ ) sur une surface horizontale élémentaire proportionnelle à la profondeur ( $z$ ) et au poids volumique du sol ( $\sigma$ ),  $\sigma_v = \sigma.z$ .

Dans un sol saturé, l'élément de sol est allégé de la poussée d'Archimède (ou pression interstitielle  $u = \sigma_w.z$ ), équivalente au volume d'eau déplacé. La contrainte totale verticale supportée par le squelette solide et l'eau ( $\sigma'_v$ ) devient  $\sigma'_v = \sigma - u = \sigma'.z$ , avec  $\sigma'$  le poids volumique du sol déjaugé.

Lorsque le niveau de l'eau varie (étiage estival, par exemple), la baisse s'accompagne d'une mise en charge du sol en profondeur. Ce qui explique en partie les grands tassements lors de sécheresses exceptionnelles (2003). C'est aussi la raison pour laquelle les experts demandent d'attendre l'automne avant de réaliser les travaux de reprise de la solidité des maçonneries. Les graphiques ci-dessous représentent l'augmentation de la contrainte effective.

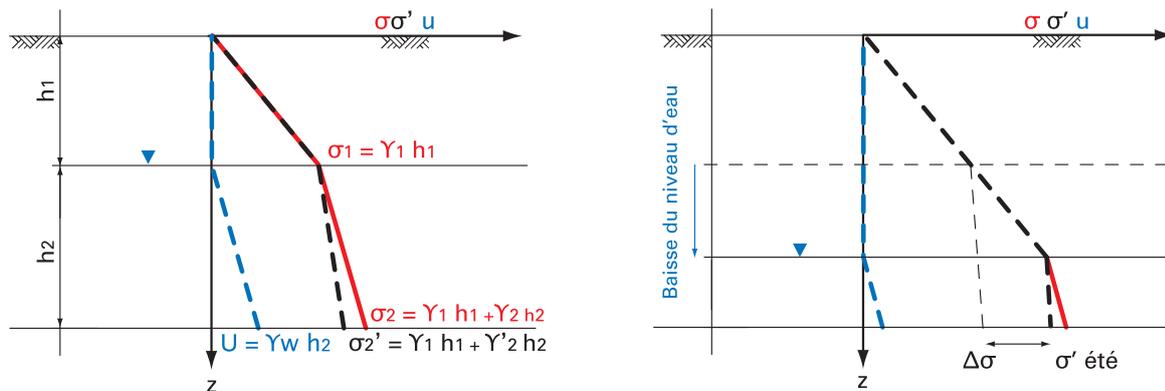


Figure 26 : Diagrammes d'évolution de la contrainte en profondeur selon la saison

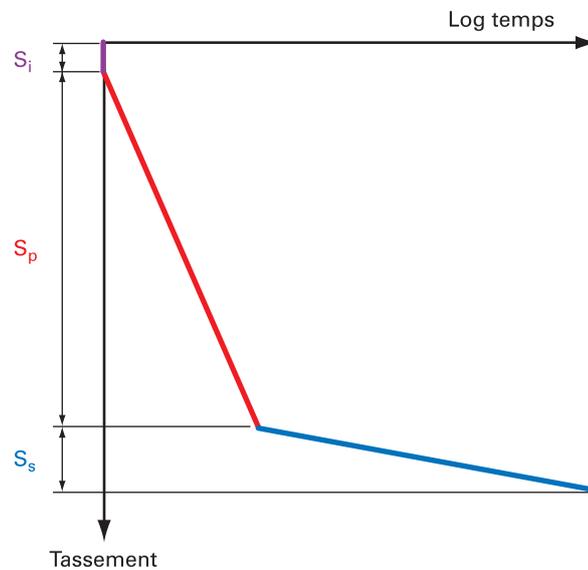
### 5.2 Contraintes dues aux surcharges d'une construction

L'appui rapide d'une charge sur un sol mouillé (marche sur du sable en limite du ressac sur la plage, par exemple) va, dans un premier temps, solliciter l'eau emprisonnée entre les grains. La rapidité du transfert des charges de l'eau vers le squelette solide dépend de la capacité de l'eau à se frayer un chemin hors de la zone sollicitée. Le déplacement de l'eau entre les grains et son évacuation sont donc liés à l'ouverture des pores, c'est-à-dire à la perméabilité du sol.

Dans le cas d'un matériau granulaire, un sable ou un gravier très perméable, le tassement est immédiat. La mise en charge de l'eau dans les pores génère une consolidation primaire par le réarrangement des grains sous l'application des charges.

Le comportement d'une argile sous charge, dont la perméabilité est un million de fois plus faible, est bien différent. Dans un premier temps, l'eau contenue le sol encaisse la charge appliquée. Puis dans un second temps, l'eau s'évacue très lentement en mettant progressivement en charge le squelette et en provoquant un réarrangement des particules argileuses. Il s'agit de la consolidation secondaire. Le tassement total sous la charge appliquée par une construction est la somme des consolidations primaire et secondaire.

Les argiles situées immédiatement sous une semelle de fondation connaîtront un tassement de consolidation primaire plus important lorsque la fouille autour de la fondation est gorgée d'eau durant le chantier.



- $S_i$  : consolidation instantanée sous charge, l'air est chassé
- $S_p$  : consolidation primaire de mise en pression de l'eau contenue dans les pores
- $S_s$  : consolidation secondaire fonction de la perméabilité du sol

Figure 27 : Les trois étapes de consolidation d'un sol sous charge

La fondation transmet des efforts au sol d'assise de manière isolée ou continue. La répartition des courbes d'isocontrainte dans le sol se nomme les « bulbes de Boussinesq ». Pour une fondation continue de largeur  $B$ , on considère que 5 % de la charge se diffuse à une profondeur d'environ cinq fois la largeur. Les courbes d'égales contraintes se resserrent en se rapprochant de la sous-face de la semelle. C'est pourquoi le sol immédiatement sous la semelle doit être apte à supporter la charge qu'elle entraîne. Lorsque, à terme, les pressions interstitielles sont nulles, on parle de « bon sol ».

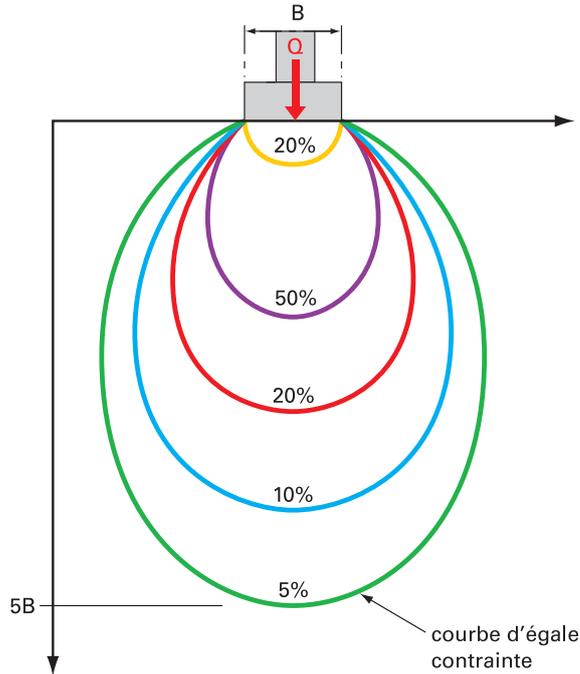


Figure 28 : Bulbes de répartition des contraintes dans le sol selon Boussinesq :

$$\sigma_{\text{calculée}} = P/S \leq \sigma_{\text{sol}}$$

La profondeur du bon sol dépend à la fois de la charge de la construction et de l'histoire du sol. La pression maximale tolérée (pression de préconsolidation) correspond à la plus grande contrainte supportée par le sol tout au long de son histoire. Un sol sous-consolidé est un sol en cours de formation et de tassement sous son propre poids comme les tourbes et les vases. Un sol normalement consolidé n'a jamais subi d'érosion ou supporté de surcharges (un glacier, par exemple). Ces sols sont sujets à des tassements, car toute surcharge augmente la contrainte effective. Un sol est surconsolidé quand la contrainte effective reste inférieure à la pression de préconsolidation.

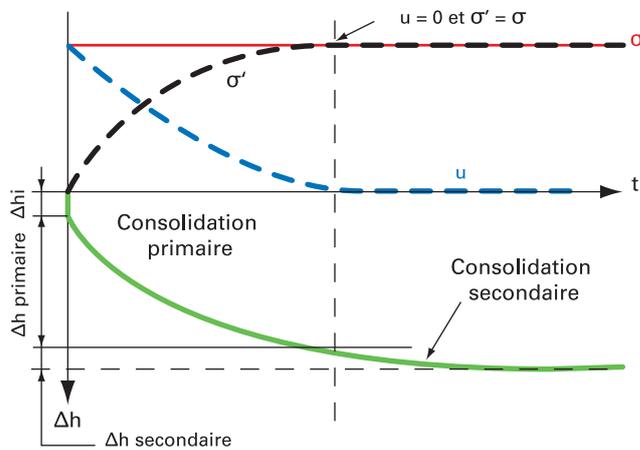


Figure 29 : Diagramme des contraintes de déformations du sol

## 6. La sécheresse : une définition relative

La « sécheresse » n'a pas de définition universelle. Sa définition est susceptible d'évoluer dans le temps et selon le lieu.

Selon la météorologie, la « sécheresse » est une longue période extrêmement sèche, pendant laquelle le manque d'eau perturbe gravement l'équilibre hydrogéologique d'une région.

Météo France définit aujourd'hui la « sécheresse » pour les sols agricoles avec la notion abordée plus haut de la réserve utile du sol, limitée aux premiers décimètres. Les terrains agricoles sont travaillés et aérés pour augmenter leur perméabilité et accélérer leur hydratation. L'agriculture moderne pompe<sup>(2)</sup> de grandes quantités d'eaux dans le sous-sol. Or, les effets de la « sécheresse géotechnique », c'est-à-dire les mouvements de sols consécutifs au retrait-gonflement des argiles préjudiciables aux constructions, se situent entre 0,50 m et 1,50 m de profondeur (voire jusqu'à 5 m de profondeur en présence d'arbres de haute tige), bien en dessous des premiers décimètres du modèle de Météo France.

Les sols argileux peuvent se désaturer et avoir des pressions d'eau négatives. La dessiccation et la réhumidification se développent de manière non uniforme depuis la surface du sol, avec une amplitude qui diminue avec la profondeur. Les interactions sol-structure dues au RGA se développent dans trois dimensions : elles commencent sur les bords de la construction et se poursuivent en profondeur tout en progressant horizontalement sous les fondations.

Le suivi de l'évolution des tassements d'un massif d'argile en fonction de la profondeur et du temps montre aussi que les déformations les plus rapides et les plus fortes se font dans la partie superficielle. Sur le site de Pessac (Gironde), les variations significatives des teneurs en eau d'un massif d'argile de Brach avec passées verticales sableuses) n'ont dépassé 1,40 m de profondeur qu'à l'apogée de la période sèche d'août 2009.

La variation de la teneur en eau, donc de volume, d'un sol argileux est accentuée par la présence des plantes et des arbres. À Montreuil (Seine-Saint-Denis), où le sol est constitué d'argiles vertes, elle atteint une profondeur de 5 m sous l'effet des racines des arbres à haute tige (fig. 34). La succion des racelles amplifie la perte de volume du sol sous les fondations et entraîne des tassements. Le calcul des déformations correspondantes montre que la surface se tasse de 7 cm sur un terrain sans arbres pour 16 cm sur un terrain avec arbres.

On le voit : l'analyse géotechnique de la « sécheresse » demande une modélisation spécifique, indépendante de celle des nappes et de la réserve hydrique agricole. Les grands désordres sur les constructions se produisent quand l'eau des couches d'argile a été aspirée sur une profondeur de plusieurs mètres par les racines ou par évaporation. Ce sont les raisons pour lesquelles on parlera dans cet ouvrage de « retrait-gonflement des argiles » (RGA), de subsidence ou de « sécheresse » entre guillemets.

2. Le pompage dans les couches souterraines relève de la gestion des nappes dévolue au ministère de l'Environnement, aidé du Bureau de recherche géologique et minier (BRGM).

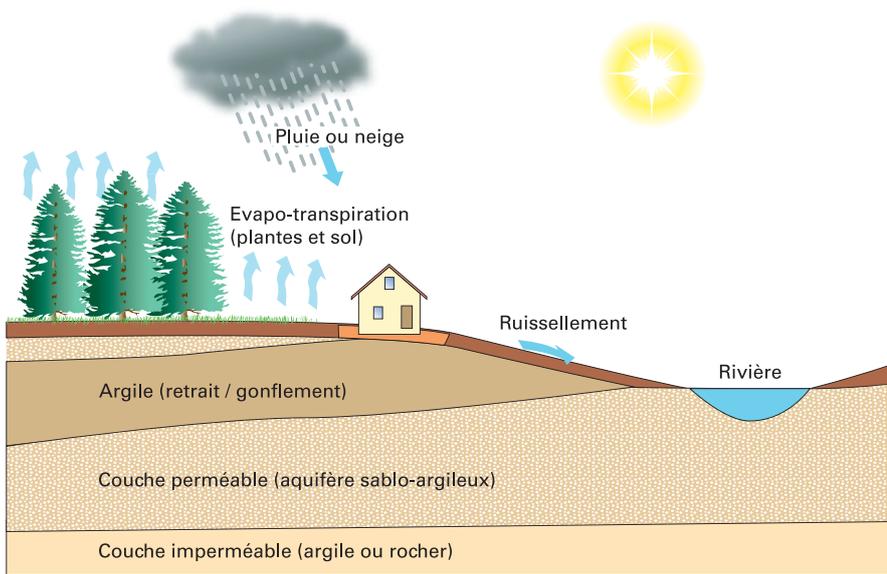


Figure 30 : Modèle géotechnique

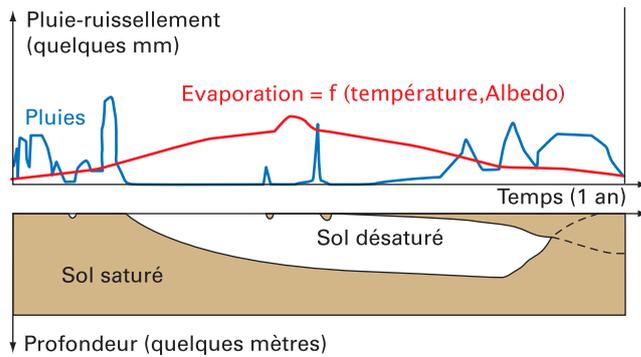
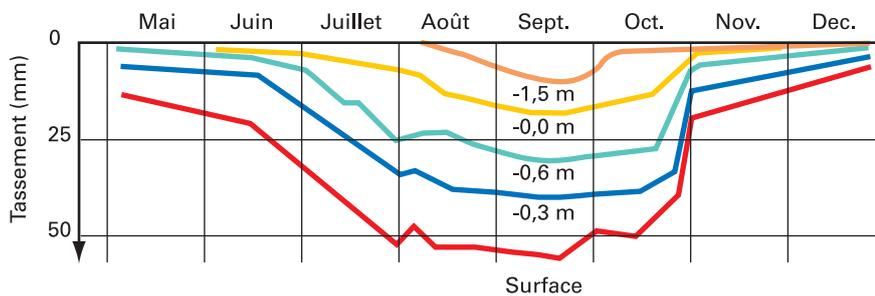


Figure 31 : Diagramme précipitations-évaporation

Figure 32 : Site expérimental de Pessac (Gironde).  
Évolution du tassement en fonction de la profondeur et de la saison

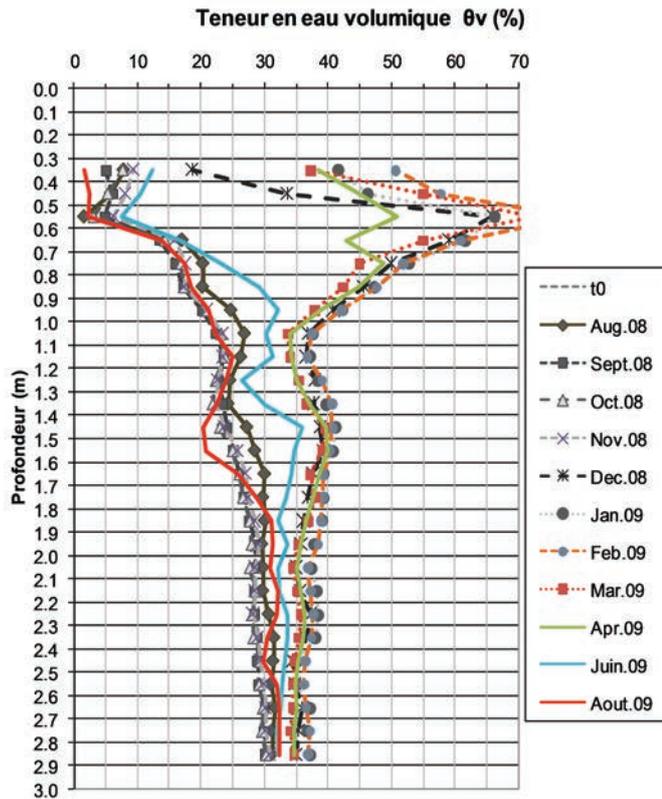


Figure 33 : Site expérimental de Pessac (I2M), en Gironde. Argile de Brach : exemple du suivi du profil hydrique d'un massif d'argile (thèse de Marie Chrétien).

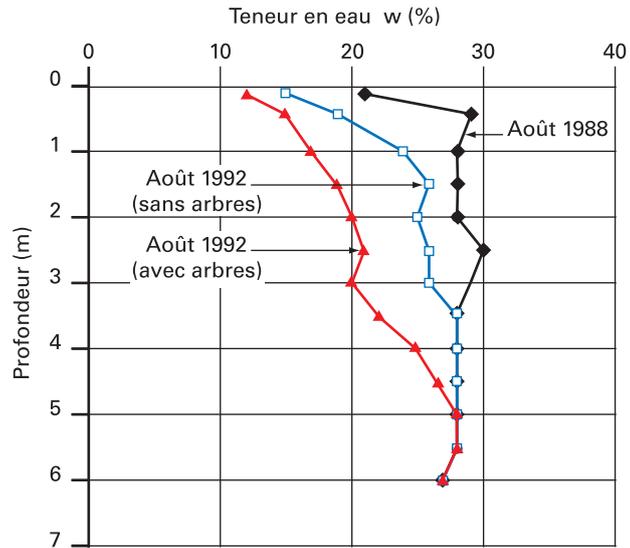


Figure 34 : Variation de la teneur en eau d'août 1988 à août 1992 dans une argile avec présence d'arbres à Montreuil (Seine-Saint-Denis)

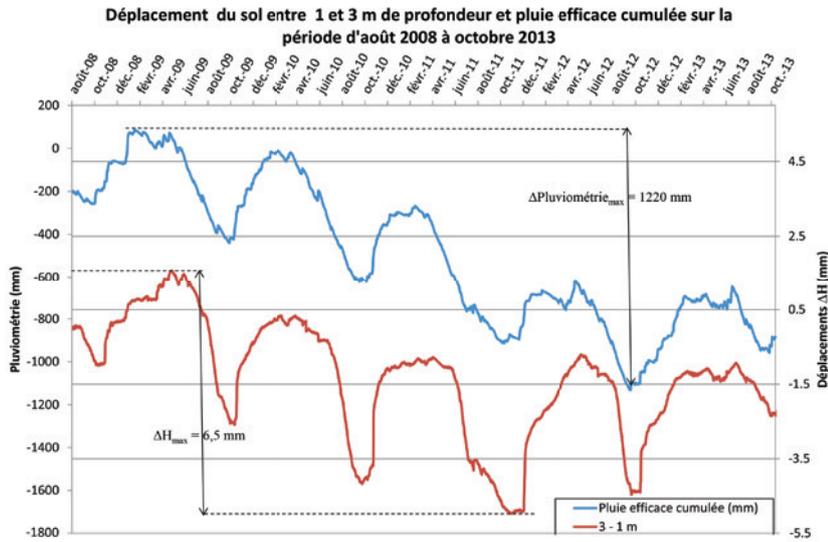


Figure 35 : Site expérimental de Pessac. Courbe d'évolution des déformations du sol argileux, entre 0 et 10 m des intervalles de profondeur, sur une période déficitaire en eau (août 2008 à décembre 2011) avec ajout de la courbe d'évolution de l'état hydrique EH (PR-ETp), ici négatif sur les trois années. Matériel utilisé : extensomètre TELEMAC ; enregistrement manuel toutes les semaines.

Les pluies efficaces représentent par jour les pluies brutes mesurées par la station météo auxquelles on soustrait l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculées par Météo-France sur un site à Mérignac, proche du site d'étude.

## 7. Assurance dommages ouvrage, catastrophe naturelle et sinistralité

La loi n° 78-12 du 4 janvier 1978, dite « loi Spinetta » régit le régime général de l'assurance obligatoire pour les constructions de moins de dix ans et englobe les dommages liés aux pathologies des fondations. L'article 1792 du Code civil relatif à la présomption de responsabilité précise :

« Tout constructeur d'un ouvrage est responsable de plein droit, envers le maître ou l'acquéreur de l'ouvrage, des dommages, même résultant d'un vice du sol, qui compromettent la solidité de l'ouvrage ou qui, l'affectant dans l'un de ses éléments constitutifs ou l'un de ses éléments d'équipement, le rendent impropre à sa destination. Une telle responsabilité n'a point lieu si le constructeur prouve que les dommages proviennent d'une cause étrangère. »

Autrement dit, tout constructeur est présumé responsable du ou des vices qui fragilisent un ouvrage réalisé par ses soins et sa responsabilité ne pourra être dérogée que s'il démontre être étranger à la cause du vice. Cette cause étrangère doit être à la fois « imprévisible, irrésistible et extérieure à l'ouvrage ».

L'article 1792-1 précise la notion de constructeur :

« Est réputé constructeur de l'ouvrage :

1° Tout architecte, entrepreneur, technicien ou autre personne liée au maître de l'ouvrage par un contrat de louage d'ouvrage ;

2° Toute personne qui vend, après achèvement, un ouvrage qu'elle a construit ou fait construire<sup>(3)</sup> ;

3° Toute personne qui, bien qu'agissant en qualité de mandataire du propriétaire de l'ouvrage, accomplit une mission assimilable à celle d'un locateur d'ouvrage. »

**Remarque**  
 Le législateur qualifie de « constructeurs » les personnes physiques ou morales assistant le maître d'ouvrage dans l'acte de construire. L'architecte, le maître d'œuvre, le constructeur de maison individuelle, le maçon et l'assistant à maître de l'ouvrage sont donc juridiquement qualifiés de « constructeurs ».

L'assurance dommages ouvrage (DO) préfinance les travaux de réparation des désordres couverts par la garantie décennale obligatoire. Elle doit être souscrite avant le démarrage du chantier. La durée effective de l'assurance DO est de 9 ans à compter de l'expiration de la garantie de parfait achèvement (1 an après réception des travaux). La loi Spinetta instaure aussi le recours contre les constructeurs responsables et leurs assureurs. Les chiffres 2013 de la base de données Sycodés relatifs à la sinistralité des fondations superficielles sur les maisons de moins de dix ans alertent sur le manque de prévention en matière de constructions neuves.

En Midi-Pyrénées, sur cent euros de cotisation versés par les constructeurs aux assureurs, cinquante sont alloués aux indemnités pour la réparation de sinistres sol.

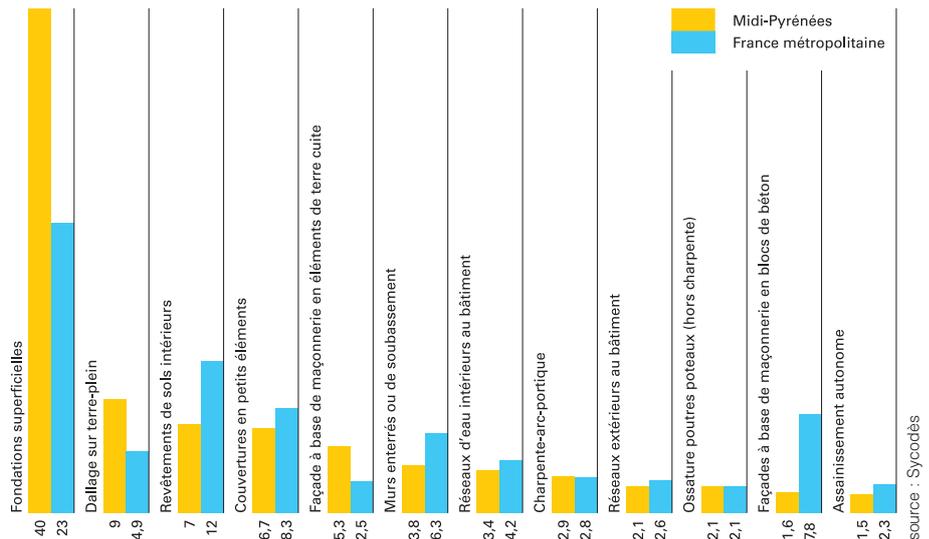


Figure 36 : Causes des désordres et coût global des réparations en Midi-Pyrénées par rapport à la France entière

Le second texte fondateur est la loi n° 82-600 du 13 juillet 1982, codifiée aux articles L. 125-1 et L. 125-6 du Code des assurances. Le régime français d'indemnisation des catastrophes naturelles, ou régime Cat-Nat, régit l'indemnisation des victimes et se réfère aux dommages matériels directs ayant eu pour « cause déterminante l'intensité anormale d'un agent, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises ».

3. Il s'agit des promoteurs non réalisateurs et de contractants généraux vendant en VEFA (vente en état futur d'achèvement).

L'état de catastrophe naturelle est constaté par arrêté interministériel et porte sur la ou les communes concernées.

Le régime Cat-Nat est alimenté par l'assurance multirisque habitation, donc par tous les propriétaires ou locataires d'une habitation puisque la souscription à une assurance dommages (habitation, auto, etc.) entraîne ipso facto la couverture des catastrophes naturelles. Le coût est de 12 % du montant global de la cotisation pour une assurance habitation et de 6 % pour une assurance automobile. À ce dispositif, qui rend la cotisation Cat-Nat abordable pour l'adhérent, s'ajoute la participation de l'État qui intervient par l'intermédiaire de la Caisse centrale de réassurance (CCR) : la CCR prend en charge environ 50 % des cotisations et 50 % du coût des sinistres. De plus, elle accorde la garantie illimitée de l'État en cas d'événement exceptionnel.

Depuis les premiers arrêtés de catastrophe naturelle pris en de 1991 à la suite de la « sécheresse » de 1989, le régime d'indemnisation Cat-Nat a déboursé 5,5 milliards d'euros<sup>(4)</sup>. Somme qui s'explique en partie par l'absence de prévention au niveau national en matière de constructions neuves et de mise en conformité des constructions existantes. Les désordres liés au retrait-gonflement des argiles constituent la deuxième source de dépenses du régime après les inondations. Depuis 1991, les désordres enregistrés ont concerné 80 % des bâtiments de moins de trente ans, c'est-à-dire des constructions dites « contemporaines ». À noter que plus des deux tiers des déclarations de sinistre sont classées sans suite et que deux sur trois font état de dommages sans rapport avec la sécheresse.

Afin de pouvoir sélectionner les communes éligibles à l'arrêté de Cat-Nat sécheresse, la « sécheresse » 2003 a posé aux météorologues la difficile question de la définition du déficit pluviométrique : qu'est-ce qu'un déficit d'« intensité anormale » ? Seules 4 434 communes remplissant les critères obligatoires ont été retenues sur les 7 500 ayant déposé des demandes de reconnaissance de catastrophe naturelle. Les indemnités versées se sont montées à 1,20 milliards € pour 138 000 sinistres retenus. Surtout, l'écrasante majorité des sinistres de l'été 2003 est imputable à la conjonction de l'humidité extrême de 2001 et de la canicule exceptionnelle d'août 2003.

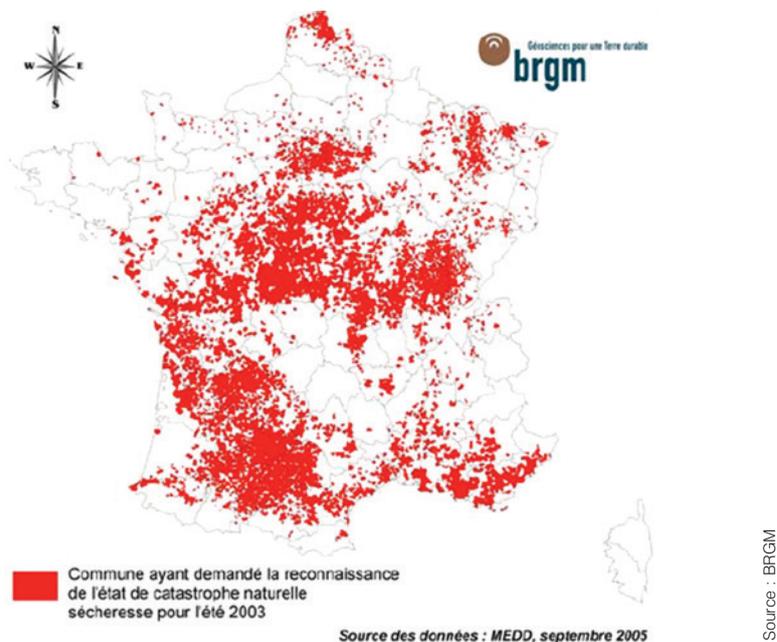
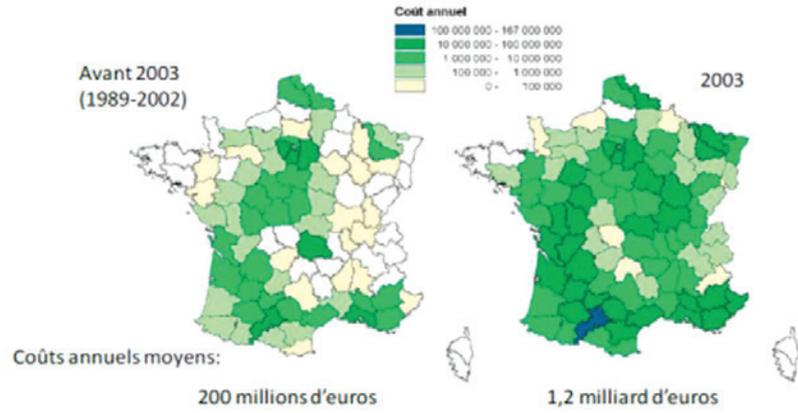


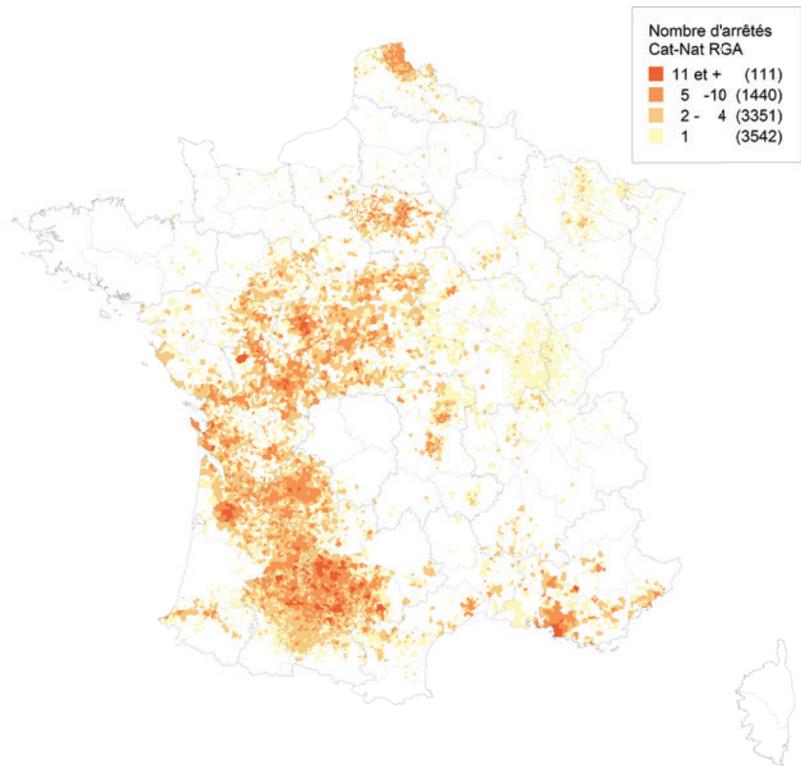
Figure 37 : Répartition des 7 000 communes françaises ayant demandé à être classées en Cat-Nat (2003)

4. 4,9 milliards d'euros entre 1989 et 2009 selon les chiffres de la Caisse centrale de réassurance (CCR) de mai 2012.



Source : BRGM

Figure 38 : Coûts des dégâts liés au retrait-gonflement entre 1989 et 2003 en France (Plat et al, 2009)



Source : BRGM

Figure 39 : Cartographie (décembre 2013) des communes argileuses ayant connu au moins un arrêté de Cat-Nat depuis 1989, avec le triste record de 21 arrêtés pour la commune de Bordeaux (source : base de données GASPARE).