



**HAL**  
open science

**Analyse de la vulnérabilité et fragilité des enjeux exposés aux phénomènes naturels : application au bâti dans le contexte torrentiel ; Rapport de Recherche, programme MTE (DGPR/SRNH)2023, pp. 110.**

Isabelle Ousset, Jean-Marc Tacnet

► **To cite this version:**

Isabelle Ousset, Jean-Marc Tacnet. Analyse de la vulnérabilité et fragilité des enjeux exposés aux phénomènes naturels : application au bâti dans le contexte torrentiel ; Rapport de Recherche, programme MTE (DGPR/SRNH)2023, pp. 110.. INRAE. 2024. hal-04682619

**HAL Id: hal-04682619**

**<https://hal.science/hal-04682619v1>**

Submitted on 30 Aug 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



**MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**INRAE**  
la science pour la vie, l'humain, la terre

## **Programme MTE (DGPR/SRNH) – INRAE 2023**

### **Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques**

Ces travaux bénéficient du soutien du ministère chargé de la transition écologique par décision de subvention n°2103343215.



#### **Prévention des inondations – Crues torrentielles**

### **Action 4.3.3 - Vulbator**

**Analyse de la vulnérabilité et fragilité des enjeux exposés aux phénomènes naturels : application au bâti dans le contexte torrentiel**

*Isabelle Ousset, Jean-Marc Tacnet (INRAE/IGE) – Version 30/04/24*



Pour citer ce rapport :

Ousset, I et Tacnet, J.-M, 2024. Analyse de la vulnérabilité et fragilité des enjeux exposés aux phénomènes naturels : application au bâti dans le contexte torrentiel ; Rapport de Recherche, programme MTE (DGPR/SRNH)2023, INRAE 2024, pp. 110.

## Table des matières

<b>1. Contexte et objectifs de l'étude .....</b>	<b>9</b>
1.1. Problématique générale.....	9
1.2. Objectif de l'étude .....	9
<b>2. Etat de l'art.....</b>	<b>10</b>
2.1. Principes globaux de dimensionnement.....	10
2.2. Phénomènes torrentiels, effets et cas de charges .....	12
2.3. Composants du risque.....	13
2.4. Notions de courbes de vulnérabilité et de fragilité .....	15
<b>3. Etape 1 : choix des configurations types de bâtiment et d'affouillement .....</b>	<b>16</b>
3.1. Typologie et géométrie des fondations.....	16
3.2. Géométries des bâtiments retenues.....	19
3.2.1. Bâtiments avec fondation de type semelle filante .....	19
3.2.1. Bâtiments avec fondation de type radier.....	20
3.3. Configurations et scénarios d'affouillement.....	22
<b>4. Etape 2 : développement de modèles de stabilité externe avec affouillement .....</b>	<b>25</b>
4.1. Données géométriques de l'affouillement des fondations.....	25
4.2. Principes généraux de justification de la stabilité externe dans un contexte d'affouillement des fondations.....	28
Principes de calcul des contraintes en fondation.....	28
4.3. Cas d'affouillement monodimensionnel.....	30
4.3.1. Cas d'une fondation de type radier – affouillement monodimensionnel.....	30
4.3.2. Cas d'une fondation filante superficielle – affouillement monodimensionnel .....	32
<b>5. Méthodologie d'analyse de l'endommagement et de la fragilité.....</b>	<b>35</b>
5.1. Définition de la charge supportée par la fondation d'une habitation .....	35
5.1.1. Calcul de la descente de charge (globale).....	36
5.1.2. Ordres de grandeur des variables intervenant dans le calcul des actions et valeurs des coefficients partiels	39
5.2. Etude de la stabilité externe d'une fondation de type radier ou semelle filante .....	42
5.2.1. Calcul de l'excentricité.....	42
5.2.2. Calcul de la contrainte de référence et de la surface d'un radier comprimé.....	43
5.2.3. Calcul de la contrainte de référence et de la surface comprimée d'une semelle filante.....	44
5.2.4. Calcul de la contrainte admissible du sol.....	47
5.2.5. Conditions de stabilité de la structure.....	49
5.3. Etude de vulnérabilité .....	50
5.3.1. Etablissement de courbes d'endommagement.....	50
5.3.2. Courbes de fragilité .....	51
<b>6. Résultats.....</b>	<b>55</b>
6.1. Estimation de $R_v$ .....	55
6.2. Courbes d'endommagement .....	57
6.2.1. Etude paramétrique .....	57
6.2.2. Courbes d'endommagement caractéristiques.....	60
6.2.3. Synthèse .....	63
6.3. Courbes de fragilité .....	63



6.3.1.	Etude paramétrique .....	63
6.3.2.	Courbes de fragilité caractéristiques .....	66
6.3.3.	Récapitulatif des courbes de fragilité établies .....	68
<b>7.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>70</b>
7.1.	Apports.....	70
7.2.	Limites de l'approche.....	71
7.3.	Perspectives .....	71
7.3.1.	Aspects techniques.....	71
	Analyse et retour d'expériences .....	71
	Démarches de calculs .....	72
7.3.2.	Transfert et intégration dans les approches d'analyse de risque .....	73
<b>8.</b>	<b>Références .....</b>	<b>74</b>
<b>9.</b>	<b>Annexes.....</b>	<b>75</b>
9.1.	Phénomènes et protection contre l'affouillement.....	75
9.2.	Calcul d'une fondation de type radier affouillée en bidimensionnel.....	77
9.2.1.	Calcul du centre de gravité de la fondation affouillée en bidimensionnel.....	77
9.2.2.	Calcul de la réaction du sol sur la base d'une fondation rectangulaire équivalente.....	78
9.2.3.	Vérification : calcul de la répartition réaliste des contraintes en fondation (Hypothèse de Meyerhof) .....	79
9.3.	Configurations quelconques d'affouillement.....	82
9.3.1.	Fondations de type radier.....	82
9.3.2.	Configurations d'affouillement de fondations de type semelle filante .....	83
9.4.	Courbes d'endommagement caractéristiques .....	86
9.4.1.	Analyse comparative des surfaces relatives d'affouillement entre radier et semelle filante .....	86
9.4.2.	Habitation de plain-pied avec radier .....	88
9.4.3.	Habitation de plain-pied avec semelle filante.....	89
9.4.4.	Habitation sur sous-sol sans étage .....	90
9.4.5.	Habitation sur vide sanitaire avec un étage .....	92
9.4.6.	Habitation sur sous-sol avec un étage .....	93
9.4.7.	Comparaison entre les différents types d'habitation .....	95
9.5.	Courbes de fragilité caractéristiques .....	97
9.5.1.	Habitation de plain-pied avec radier.....	97
9.5.2.	Habitation de plain-pied avec semelle filante.....	99
9.5.3.	Habitation sur sous-sol sans étage .....	102
9.5.4.	Habitation sur vide sanitaire avec un étage .....	102
9.5.5.	Habitation sur sous-sol et avec un étage.....	103
9.5.6.	Comparaison entre types de bâti .....	104

## Tableaux

Tableau 1 : Correspondance entre type de fondation et nombre d'étages pour des bâtiments d'habitation.....	18
Tableau 2 : Poids surfaciques des matériaux les plus courants constitutifs des murs porteurs des habitations (Sources : Grand Guide de la Maçonnerie publié aux éditions Bilp, 2017 (Caillard 2017) et <a href="http://www.leplancherpoutrelshourdispourlesnuls.com">http://www.leplancherpoutrelshourdispourlesnuls.com</a> ) .....	40
Tableau 3 : Poids surfaciques des planchers inter-niveaux autres que les combles (Source : <a href="http://www.leplancherpoutrelshourdispourlesnuls.com">http://www.leplancherpoutrelshourdispourlesnuls.com</a> ) .....	40
Tableau 4 : Valeurs des charges d'exploitation des habitations en fonction du type d'usage (Source : norme NF EN 1991-1-1 et son annexe NF P 06-111-2 (AFNOR 2004)) .....	40
Tableau 5 : Ordres de grandeur des paramètres de dimensionnement du bâti et des caractéristiques des matériaux le constituant.....	41
Tableau 6 : Coefficients partiels relatifs aux combinaisons d'actions .....	41
Tableau 7 : Gamme de pression limite pour différents types de sols (Gupta & Sundaram 2003) .....	47
Tableau 8 : Classement des sols en fonction de la pression limite, selon la norme NF P 94-261, Tab. A.2.1 (AFNOR 2004).....	48
Tableau 9 : Valeurs et caractéristiques retenues pour les paramètres relatifs à la résistance du sol .....	49
Tableau 10 : Définition et caractéristiques des variables intervenant dans le calcul des actions supportées par la fondation d'une habitation de type radier ou semelle filante.....	52
Tableau 11 : Ordres de grandeur du poids (en kN) d'une habitation d'une surface au sol de 100 m <sup>2</sup> (Source : Construire Habitat).....	55
Tableau 12 : Estimation de la charge globale $R_v$ en kN pour quelques cas de figure de bâti avec combles non aménageables et toiture à 2 pans de surface au sol égale à 100 m <sup>2</sup> .....	56
Tableau 13 : Valeurs des variables (minimales, maximales ou moyennes) intervenant dans l'établissement des différentes courbes d'endommagement enveloppes (min et max) et moyennes, suivant le type de fondation.....	59
Tableau 14 : Résumé des courbes d'endommagement établies pour du bâti soumis à un risque d'affouillement torrentiel .....	60
Tableau 15 : Taux d'affouillement minimal et maximal conduisant à la défaillance pour différents types d'habitation et types de matériau de construction aux ELU de portance du sol et de renversement en situations transitoire et accidentelle .....	62
Tableau 16 : Synthèse des courbes de fragilité établies pour du bâti soumis à un risque d'affouillement torrentiel.....	69
Tableau 17 : Comparaison des ratios entre surface affouillée et surface totale de fondation entre fondation de type radier et semelle filante en fonction de la longueur d'affouillement $w_s$ (étude paramétrique en fonction de l valant 7, 10 puis 13m) .....	86
Tableau 18 : Comparaison des ratios entre surface affouillée et surface totale de fondation entre fondation de type radier et semelle filante en fonction de la largeur d'affouillement $w_s$ (étude paramétrique en fonction de b valant 7, 10 puis 13m).....	87

## Figures

Figure 1 : Notions de stabilité externe et interne .....	11
Figure 2 : Exemples de défauts de stabilité externe .....	11
Figure 3 : Exemples de défauts de stabilité interne et exemples de décomposition en éléments structuraux, de modèles mécaniques associés.....	12
Figure 4 : Effets des phénomènes torrentiels sur un bâtiment .....	12
Figure 5 : Un scénario de cas de charges combine la nature du phénomène, des effets, des actions, leur intensité et la nature de la structure concernée. ....	13
Figure 6 : Représentation simplifiée des composants du risque dans le domaine des risques naturels et industriels (Tacnet 2009).....	14
Figure 7 : Modèle de risque utilisé par le GIECC (en français) ou IPCC (en anglais) - <a href="https://www.ipcc.ch/">https://www.ipcc.ch/</a> .....	14
Figure 8 : Composants du risque , adapté d'après (Tacnet 2009) .....	15
Figure 9 : Typologie de fondations souples, rigides, superficielles et semi-profondes.....	17
Figure 10 : Types de fondation sur radier (a), semelle filante (b), plots (c) ou pieux (d).....	17
Figure 12 : Exemples de configurations de différents type de radier superficiel (a), semi-enterré avec vide sanitaire (b), enterré (c).....	18
Figure 13 : Exemples de configurations de différents type de semelles filantes superficielles (a), semi-enterrées avec vide sanitaire (b), enterrées (c).....	19



Figure 14 : Configuration de bâtiment avec fondation de type semelle filante (plain-pied ou avec un étage) : description des composants du bâtiment .....	20
Figure 15 : Configuration de bâtiment avec fondation de type semelle filante (plain-pied ou avec un étage) : données géométriques et notations.....	20
Figure 16 : Configuration de bâtiment avec fondation de type radier (plain-pied avec un sous-sol , avec un étage et un sous-sol) : description des composants du bâtiment .....	21
Figure 17 : Configuration de bâtiment avec fondation de type radier (plain-pied avec un sous-sol , avec un étage et un sous-sol) : données géométriques et notations .....	21
Figure 18 : Dégâts post tempête Alex 2 Octobre 2020 (Saint Dalmas de Tende, Vallon de Bieugne, Vallée de la Roya ) – crédit : ONF/RTM - voir aussi (ONF-RTM & INRAE 2022).....	22
Figure 19 : Dégâts post tempête Alex 2 Octobre 2020 (Tende, Vallée de la Roya) – crédit : ONF/RTM - (ONF-RTM & INRAE 2022).....	22
Figure 20 : Configurations d'affouillement mono- et bi-dimensionnelles.....	23
Figure 21 : Configurations d'affouillement mono-dimensionnel sous une fondation de type radier et sous une fondation de type fondation superficielle .....	23
Figure 22 : Principes des notations adoptées pour décrire la géométrie des configurations d'affouillement.....	24
Figure 23 : Exemple de scénario d'évolution d'un lit torrentiel pouvant conduire à l'affouillement de fondations de bâtiments situés sur les berges (1/2).....	24
Figure 24 : Exemple de scénario d'évolution d'un lit torrentiel pouvant conduire à l'affouillement de fondations de bâtiments situés sur les berges (2/2).....	25
Figure 25 : La proximité d'un talus par rapport à une fondation réduit la capacité portante du sol à considérer dans les calculs.....	26
Figure 26 : La proximité d'un talus va réduire la capacité portante des fondations : une analyse qualitative de l'exposition des bâtiments est envisageable a priori.....	26
Figure 27 : Des règles empiriques peuvent, sans calcul, permettre de prédéterminer la sensibilité de bâtiments au phénomène d'affouillement.....	27
Figure 28 : Une fondation de type radier enterré est moins sensible en cas d'affouillement.....	27
Figure 29 : Modèle de répartition des contraintes en fondation de type Navier et Meyerhof .....	29
Figure 30 : Calcul de l'excentricité d'une fondation affouillée et comparaison entre les surfaces comprimées sous la fondation déterminées avec les modèles de répartition de contraintes en fondation de type Navier (forme trapézoïdale ou triangulaire) et Meyerhof (contrainte uniforme).....	29
Figure 31 : Calcul de l'excentricité résultant de l'affouillement d'une fondation .....	30
Figure 32 : Calcul de la surface réduite (équivalente) et des coordonnées du centre de gravité d'une fondation de type radier affouillée dans une contexte monodimensionnel (sur toute la longueur L) .....	31
Figure 33 : Calcul de la contrainte de réaction du sol selon le modèle de Meyerhof (réaction uniforme) dans le cas d'un radier affouillé de manière monodimensionnelle.....	31
Figure 34 : Analyse graphique du positionnement du centre de poussée de la réaction du sol en fondation (cas n°1).....	33
Figure 35 : Analyse graphique du positionnement du centre de poussée de la réaction du sol en fondation (cas n°2).....	34
Figure 36 : Analyse graphique du positionnement du centre de poussée de la réaction du sol en fondation (cas n°3).....	34
Figure 37 : Analyse graphique du positionnement du centre de poussée de la réaction du sol en fondation (cas n°4).....	35
Figure 38 : Types de bâtis étudiés.....	36
Figure 39 : Profondeur minimale hors gel, pour des altitudes inférieures à 150 m (Source : DTU 13.1).....	39
Figure 40 : Caractéristiques d'affouillement pour les deux cas de fondations étudiés (radier et semelle filante) .....	42
Figure 41 : Radier de fondation : (a) Dimensions, (b) Radier avant affouillement et (c) Radier après affouillement .....	43
Figure 42 : Diagramme des contraintes appliquées sous le radier : (a) sans affouillement, (b) avec affouillement .....	43
Figure 43 : Cas1 - Configuration de la surface comprimée $A_{eff}$ (en rouge grisé) pour une fondation de type semelle filante dans le cas d'une largeur d'affouillement $w_s$ (zone affouillée en jaune grisé) inférieure à la largeur $b_s$ de la semelle .....	44
Figure 44 : Cas 2 - Configuration de la surface comprimée $A_{eff}$ (en rouge grisé) pour une fondation de type semelle filante dans le cas d'une largeur d'affouillement $w_s$ (zone affouillée en jaune grisé) égale à la largeur $b_s$ de la semelle .....	45
Figure 45 : Cas 3 - Configuration de la surface comprimée $A_{eff}$ (en rouge grisé) pour une fondation de type semelle filante dans le cas d'une largeur d'affouillement $w_s$ (zone affouillée en jaune) comprise entre la largeur $b_s$ et la moitié de la longueur $b + b_s$ de la semelle.....	45
Figure 46 : Cas 4 - Configuration d'une fondation de type semelle filante affouillée sur une largeur $w_s$ (zone affouillée en jaune grisé) supérieure à la moitié de la longueur $b + b_s$ de la semelle.....	46
Figure 47 : Abaque permettant de déterminer le coefficient réducteur de la portance $i\beta$ lié à la proximité d'un talus (Source : (Cerema 2014)).....	48
Figure 48 : Parties affouillées, non affouillées et comprimées d'une fondation de type radier.....	49
Figure 49 : Méthode d'établissement des courbes de fragilité par simulations Monte-Carlo adapté d'après (Ousset et al.	

2022).....	54
Figure 50 : Influence (à l'ELU transitoire) de la longueur du bâti sur les courbes d'endommagement par affouillement d'une habitation de plain-pied, tous matériaux confondus, avec une fondation de type (a) radier et (b) semelle filante.....	58
Figure 51 : Influence (à l'ELU transitoire) de la largeur du bâti (dimension selon laquelle est analysé l'affouillement) sur les courbes d'endommagement par affouillement d'une habitation de plain-pied, tous matériaux confondus, avec une fondation de type (a) radier et (b) semelle filante.....	58
Figure 52 : Influence (à l'ELU transitoire) des caractéristiques du bâti intervenant dans le calcul de son poids et autres que ses dimensions au sol (épaisseurs dalles et planchers, poids spécifiques...), sur les courbes d'endommagement par affouillement d'une habitation de plain-pied, tous matériaux confondus, avec une fondation de type (a) radier et (b) semelle filante .....	58
Figure 53 : Influence (à l'ELU transitoire) des caractéristiques du sol de fondation sur les courbes d'endommagement par affouillement d'une habitation de plain-pied, tous matériaux confondus, avec une fondation de type (a) radier et (b) semelle filante .....	59
Figure 54 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied avec radier, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	61
Figure 55 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied avec semelle filante, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	61
Figure 56 : Courbes d'endommagement enveloppes pour les différents types d'habitation étudiés, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel .....	62
Figure 57 : Taux d'affouillement minimal et maximal conduisant à la défaillance pour les différents types d'habitation étudiés (habitations de plain-pied avec fondation de type radier et de type semelle filante, et avec l'hypothèse d'un radier : habitation sur vide sanitaire avec un étage, habitation sur sous-sol sans étage et habitation sur sous-sol avec un étage) avec, pour chaque type de bâti, ces taux calculés à l'ELU transitoire (à gauche) et à l'ELU accidentel (à droite) pour différents types de matériau de construction .....	63
Figure 58 : Influence du type de murs sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier, à l'ELU transitoire et pour $i\beta = 0.3$ et $ple^* = 1$ MPa.....	64
Figure 59 : Courbes de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier pour différents types ou catégories de murs, à l'ELU transitoire et pour $i\beta = 0.3$ et $ple^* = 1$ MPa.....	64
Figure 60 : Courbes de fragilité à retenir pour une habitation de plain-pied avec radier pour différentes catégories de murs, à l'ELU transitoire et pour $i\beta = 0.3$ et $ple^* = 1$ MPa.....	65
Figure 61 : Courbes de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier à l'ELU transitoire pour différents types de murs et différentes caractéristiques de sol (valeurs de $i\beta$ et $ple^*$ minimales : $i\beta = 0.3$ et $ple^* = 1$ MPa , aléatoires et maximales : $i\beta = 0.55$ et $ple^* = 3$ MPa) .....	65
Figure 62 : Influence des états limites ultimes (ELU) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier, pour $i\beta = 0.3$ et $ple^* = 1$ MPa et différents types de murs.....	66
Figure 63 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti avec une fondation de type radier (sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage), tous matériaux confondus, pour $i\beta = 0.3$ et $ple^* = 1$ MPa.....	66
Figure 64 : Courbes de fragilité d'une habitation de plain-pied avec une fondation de type semelle filante, tous matériaux confondus, pour $i\beta = 0.3$ et $ple^* = 1.5$ MPa.....	67
Figure 65 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti (plain-pied avec radier ou semelle filante, habitation sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage), tous matériaux confondus, pour $i\beta$ et $ple^*$ aléatoires .....	67
Figure 66 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti (plain-pied avec radier ou semelle filante), tous matériaux confondus, pour $i\beta = 0.55$ et $ple^* = 3$ MPa.....	68
Figure 67 : Exemple d'information collectée et accessible sur la plateforme MUREX ( <a href="https://rex.cerema.fr/">https://rex.cerema.fr/</a> ).....	72
Figure 68 : Exemple d'information collectée et accessible sur la plateforme MUREX ( <a href="https://rex.cerema.fr/">https://rex.cerema.fr/</a> ).....	72
Figure 69 : Exemples de cas d'affouillement d'ouvrages de protection contre les risques torrentiels.....	75
Figure 70 : Localisation et aggravation des zones d'érosion latérale liées à des engravements ou à la présence d'obstacles modifiant les directions d'écoulement (Tacnet & Degoutte 2013).....	76
Figure 71 : Dispositions constructives de protection contre l'affouillement latéral et longitudinal de protections de berges en enrochement (Tacnet & Degoutte 2013).....	76
Figure 72 : Calcul de centre de gravité de la surface rectangulaire fictive équivalente à la zone de fondation restant en contact avec le sol après affouillement.....	77
Figure 73 : Calcul du centre de gravité d'une fondation de type radier affouillée de manière quelconque (rectangulaire)..	78
Figure 74 : Principe de détermination d'une fondation rectangulaire équivalente (après affouillement).....	79
Figure 75 : L'approche de Meyerhof reste une approche de calcul : la répartition des contraintes n'est pas réaliste et la surface n'est pas conservée .....	80
Figure 76 : Principe de détermination des contraintes en fondation en utilisant un modèle de type Navier : le sol est assimilé à une poutre soumise à une flexion composée .....	81



Figure 77 : Description des typologies d'affouillement de fondations de type semelle radier.....	82
Figure 78 : codification des surfaces pour le calcul du centre de gravité d'une semelle de type radier .....	82
Figure 79 : Description des typologies d'affouillement de fondations de type semelle filante (largeur d'affouillement inférieure ou égale à la largeur de la fondation $b_f$ ).....	83
Figure 80 : Description des typologies d'affouillement de fondations de type semelle filante (largeur d'affouillement supérieure à la largeur de la fondation $b_f$ ).....	83
Figure 81 : Codification des surfaces pour le calcul.....	84
Figure 82 : codification des surfaces pour le calcul du centre de gravité d'une semelle filante affouillée .....	84
Figure 83 : Calcul du centre de gravité d'une fondation de type semelle filante affouillée dans un angle.....	85
Figure 84 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire avec radier à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel .....	88
Figure 85 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en moellons avec radier à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	88
Figure 86 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en pierres avec radier à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	88
Figure 87 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied avec radier, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel .....	89
Figure 88 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire avec semelle filante à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel .....	89
Figure 89 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en moellons avec semelle filante à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	89
Figure 90 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en pierres avec semelle filante à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	90
Figure 91 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied avec semelle filante, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	90
Figure 92 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol sans étage en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	90
Figure 93 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol sans étage en moellons à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	91
Figure 94 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol sans étage en pierres à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	91
Figure 95 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol sans étage, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	91
Figure 96 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel .....	92
Figure 97 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage en moellons à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	92
Figure 98 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage en pierres à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	92
Figure 99 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	93
Figure 100 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol avec un étage en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	93
Figure 101 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol avec un étage en moellons à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	93
Figure 102 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol avec un étage en pierres à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	94
Figure 103 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol avec un étage, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	94
Figure 104 : Courbes d'endommagement enveloppes pour les différents types d'habitation étudiés, en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	95
Figure 105 : Courbes d'endommagement enveloppes pour les différents types d'habitation étudiés, en moellons, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	95
Figure 106 : Courbes d'endommagement enveloppes pour les différents types d'habitation étudiés, en pierres, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	96
Figure 107 : Courbes d'endommagement enveloppes pour les différents types d'habitation étudiés, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel.....	96
Figure 108 : Influence des paramètres du sol ( $i\beta$ et $p_{le}^*$ ) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec	

radier et murs en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire, à l'ELU transitoire.....	97
Figure 109 : Influence des paramètres du sol ( $i\beta$ et $ple *$ ) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier et murs en moellons, à l'ELU transitoire.....	97
Figure 110 : Influence des paramètres du sol ( $i\beta$ et $ple *$ ) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier et murs en pierres, à l'ELU transitoire.....	98
Figure 111 : Influence des paramètres du sol ( $i\beta$ et $ple *$ ) sur la courbe de fragilité globale (tous matériaux confondus) d'une habitation de plain-pied avec radier, à l'ELU transitoire.....	98
Figure 112 : Influence des états limites ultimes (ELU) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier, pour $i\beta$ et $ple *$ aléatoires et différents types de murs.....	98
Figure 113 : Courbes de fragilité à l'ELU transitoire d'une habitation de plain-pied en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol.....	99
Figure 114 : Courbes de fragilité à l'ELU accidentel d'une habitation de plain-pied en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol.....	99
Figure 115 : Courbes de fragilité à l'ELU transitoire d'une habitation de plain-pied en moellons avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol.....	99
Figure 116 : Courbes de fragilité à l'ELU accidentel d'une habitation de plain-pied en moellons avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol.....	100
Figure 117 : Courbes de fragilité à l'ELU transitoire d'une habitation de plain-pied en pierres avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol.....	100
Figure 118 : Courbes de fragilité à l'ELU accidentel d'une habitation de plain-pied en pierres avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol.....	100
Figure 119 : Courbes de fragilité à l'ELU transitoire d'une habitation de plain-pied avec semelle filante, tous matériaux confondus, pour différentes caractéristiques de sol.....	101
Figure 120 : Courbes de fragilité à l'ELU accidentel d'une habitation de plain-pied avec semelle filante, tous matériaux confondus, pour différentes caractéristiques de sol.....	101
Figure 121 : Influence du type de murs et des états limites ultimes (ELU) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec semelle filante, pour $i\beta = 0.55$ et $ple * = 2$ MPa.....	101
Figure 122 : Courbes de fragilité d'une habitation sur sous-sol sans étage, pour $i\beta = 0.3$ et $ple * = 1$ MPa.....	102
Figure 123 : Courbes de fragilité d'une habitation sur sous-sol sans étage, pour $i\beta$ et $ple *$ aléatoires.....	102
Figure 124 : Courbes de fragilité d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage, pour $i\beta = 0.3$ et $ple * = 1$ MPa.....	102
Figure 125 : Courbes de fragilité d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage, pour $i\beta$ et $ple *$ aléatoires.....	103
Figure 126 : Courbes de fragilité d'une habitation sur sous-sol avec un étage, pour $i\beta = 0.3$ et $ple * = 1$ MPa.....	103
Figure 127 : Courbes de fragilité d'une habitation sur sous-sol avec un étage, pour $i\beta$ et $ple *$ aléatoires.....	103
Figure 128 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti (sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage) en moellons, pour $i\beta = 0.3$ et $ple * = 1$ MPa.....	104
Figure 129 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti (sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage) en pierres, pour $i\beta = 0.3$ et $ple * = 1$ MPa.....	104
Figure 130 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti (sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage) en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire avec radier, pour $i\beta = 0.3$ et $ple * = 1$ MPa.....	105
Figure 131 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti avec radier (sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage) tous matériaux confondus, pour $i\beta = 0.3$ et $ple * = 1$ MPa.....	105

# 1. Contexte et objectifs de l'étude

## 1.1. Problématique générale

L'analyse des risques naturels et le choix des mesures de réduction impliquent de caractériser les dommages causés aux enjeux exposés à des phénomènes de nature et d'intensité variables. Dans le contexte torrentiel, les effets des phénomènes correspondent à des submersions, des impacts (blocs, flottants), engravements mais aussi à des affouillements qui menacent les fondations des structures touchées et constituent une cause majeure de dégâts, pouvant conduire à la destruction des structures de génie civil (ponts, bâtiments...) comme cela a pu être observé dans le cadre de la crue du 2 Octobre 2020 dans les Alpes Maritimes. Malgré son caractère essentiel, cet aspect reste assez peu étudié.

Dans ce contexte, la problématique d'analyse de l'endommagement des ouvrages (et notamment le bâti) se pose sur les plans structuraux, fonctionnels et économiques (Tacnet et al. 2016). Ceci nécessite de comprendre comment et dans quelles conditions les ouvrages peuvent être détruits : quels sont les mécanismes mis en jeu ? Comment la stabilité externe puis interne de la structure est-elle mise en défaut en fonction de l'intensité et la nature des actions et des cas de charges pour les différents effets associés aux phénomènes torrentiels (submersion, affouillement, impact etc.) ? Ces approches nécessitent d'imaginer des modèles mécaniques décrivant les configurations réelles de construction puis de les confronter aux données et observations existantes. Différents travaux existent notamment dans le domaine des ouvrages de correction torrentielle mais peu d'applications ont été faites dans le contexte des infrastructures exposées telles que les bâtiments.

Des travaux récents (Carladous 2017) se sont intéressés à la problématique de l'efficacité structurale et fonctionnelle des ouvrages de protection en identifiant des premiers indicateurs. D'autres travaux (Chahrouh et al. 2021) ont mobilisé le cadre de la sûreté de fonctionnement et montré comment prendre en compte une défaillance de type affouillement pour analyser des stratégies de maintenance de ces ouvrages.

Pour analyser l'efficacité économique des ouvrages, le cadre des analyses coûts-bénéfices est utilisé dans le cadre des plans d'actions de prévention des inondations (PAPI). Au niveau pratique, les analyses coûts-bénéfices exploitent souvent des analyses de dommages économiques en se basant sur des coûts de réparation estimés par des experts après sinistres ou des retours d'expérience sans analyse spécifique des causes de dégâts. Pour intégrer le volet torrentiel, des classes d'intensité et de dégâts restent cependant nécessaires pour imaginer décliner l'approche classique du contexte inondations au contexte torrentiel quand ceci est possible. La question reste ici de savoir comment définir des seuils.

## 1.2. Objectif de l'étude

L'approche développée par INRAE, en partenariat avec les services RTM de l'ONF dans le cadre d'une action plus globale, a pour objectif de caractériser les modes et niveaux de défaillance de stabilité externe d'infrastructures de type bâti exposé aux phénomènes torrentiels avec un focus particulier sur l'effet spécifique que constitue l'affouillement. Après une analyse de la nature des observations et retours d'expériences existants, le but est de proposer des indicateurs de stabilité (d'efficacité) structurale (externe) et de construire des courbes de vulnérabilité et d'endommagement.

Ce rapport est une contribution à l'analyse des modes d'endommagement des enjeux de type bâti pouvant être détruits par un phénomène torrentiel et tout particulièrement en cas d'affouillement. L'intensité du phénomène (la largeur, longueur, profondeur d'affouillement) va provoquer un dommage. Le niveau de dommage est caractérisé par ce qu'on appelle une courbe de vulnérabilité qui relie une intensité à un niveau de dommage. Dans le domaine du génie civil, la vulnérabilité correspond souvent à l'endommagement. Il faut cependant noter que, dans le contexte d'analyse des risques naturels, le terme vulnérabilité est utilisé dans une acceptation correspondant plus à un potentiel de perte, de conséquences qui inclut aussi la notion de valeur. Il faut donc être attentif au contexte et savoir reconnaître à quoi on fait référence en

utilisant ce terme.

La connaissance du niveau de dommage est une donnée essentielle qui permet de calculer son coût en prenant en compte les frais de réparation, reconstruction. Dans le cadre des approches développées dans le cadre des analyses coûts bénéfiques (ACB) /AMC, par exemple dans le contexte des inondations, les valeurs de dommages sont souvent obtenues, proposées sans forcément passer par l'étape d'analyse du comportement physique des structures. Une approche économique peut en effet être réalisée de manière tout à fait satisfaisante sur la base de valeurs moyennes de dommages en euros. L'approche proposée dans ce rapport est complémentaire et repose sur une analyse du comportement structural d'un bâtiment. Elle comporte deux objectifs :

1. Le premier consiste à caractériser le taux d'endommagement d'un bâtiment soumis à l'effet d'un phénomène d'une intensité donnée. Le phénomène est ici la crue torrentielle, son effet est l'affouillement et son intensité est caractérisée par la géométrie de l'affouillement (zone affouillée en toute rigueur). Les résultats de ce type d'approche sont des modèles analytiques de stabilité puis des courbes d'endommagement reliant par exemple une profondeur et un taux d'endommagement ;
2. Le second objectif consiste à analyser comment l'incertitude sur les paramètres de calcul (dimensions des bâtiments, nature, caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux...) peuvent influencer les niveaux de dommages. Le résultat de ce type d'approche est une courbe de fragilité qui exprime une probabilité d'atteinte d'un seuil de défaillance donné en fonction d'un niveau de défaillance donné (Ousset et al. 2022). On a donc plus une valeur unique de taux d'endommagement mais une probabilité de défaillance.

Le rapport est structuré de la manière suivante :

- La première section décrit la problématique et les objectifs ;
- La seconde section rappelle et décrit les phénomènes, leurs effets, les composants du risque et leurs liens avec les niveaux d'endommagement, les principes de justification de la stabilité de structures de génie avant de présenter la méthodologie de construction des courbes de vulnérabilité et de fragilité ;
- Les troisièmes et quatrièmes sections décrivent les configurations de l'aléa et des enjeux ainsi que les principes de justification de la stabilité de structures de génie retenus avant de présenter en cinquième section la méthodologie de construction des courbes de vulnérabilité et de fragilité ;
- La sixième section présente les résultats obtenus et leur interprétation ;
- Enfin, les annexes présentent des compléments thématiques sur la problématique d'affouillement, des méthodologies de calcul complémentaires et des résultats plus complets relatifs aux courbes de vulnérabilité et d'endommagement.

## 2. Etat de l'art

### 2.1. Principes globaux de dimensionnement

Une structure soumise à des efforts va subir des déformations et déplacements. Au-delà de certains seuils, les matériaux supportant la structure ou constituant la structure elle-même vont céder ; on parle alors de rupture.

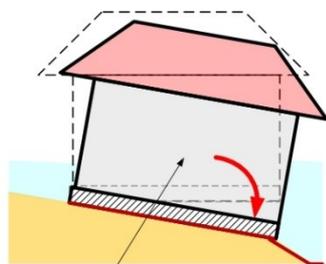
La justification de la stabilité d'une structure comprend l'analyse des stabilités externes et internes (Tacnet & Degoutte 2013). La stabilité du support, la structure étant considérée comme rigide ou indéformable, est qualifiée de stabilité externe (Figure 1). Les actions appliquées doivent être reprises par les réactions d'appui. La justification de la stabilité externe d'une structure de génie civil repose sur la vérification d'équilibres de glissement, de renversement et de mobilisation de la capacité portante en fondation (Tacnet & Degoutte 2013; Deymier et al. 1995). La stabilité des composants de la structure elle-même est qualifiée de stabilité interne. On analyse ici le comportement de la structure en terme de niveau de contrainte pouvant entraîner la rupture et aussi de déformations (Figure 1).

Un des modes de défaillance le plus courant dans un contexte torrentiel est celui de l'affouillement des fondations<sup>1</sup> (MTECT/DGPR 2023). Cet affouillement induit une suppression des appuis en fondation sur une surface plus ou moins

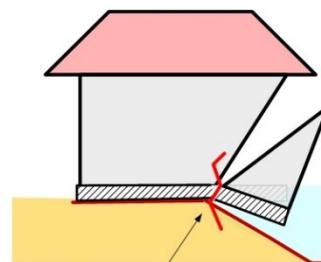
---

<sup>1</sup>Voir Guide PPR torrentiel (2023) - <https://www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-inondations>

grande. Ceci a pour effet de modifier l'excentricité de la résultante des forces verticales avec pour conséquence d'augmenter les contraintes exercées par la semelle non affouillée sur le sol. Au-delà de certaines limites, le sol va se tasser de manière excessive jusqu'à ne carrément plus être capable de résister, provoquant alors un défaut de stabilité externe par rupture avec des conséquences sur la structure elle-même.



**Défaut de stabilité externe :** le solide (bâtiment) est supposé indéformable

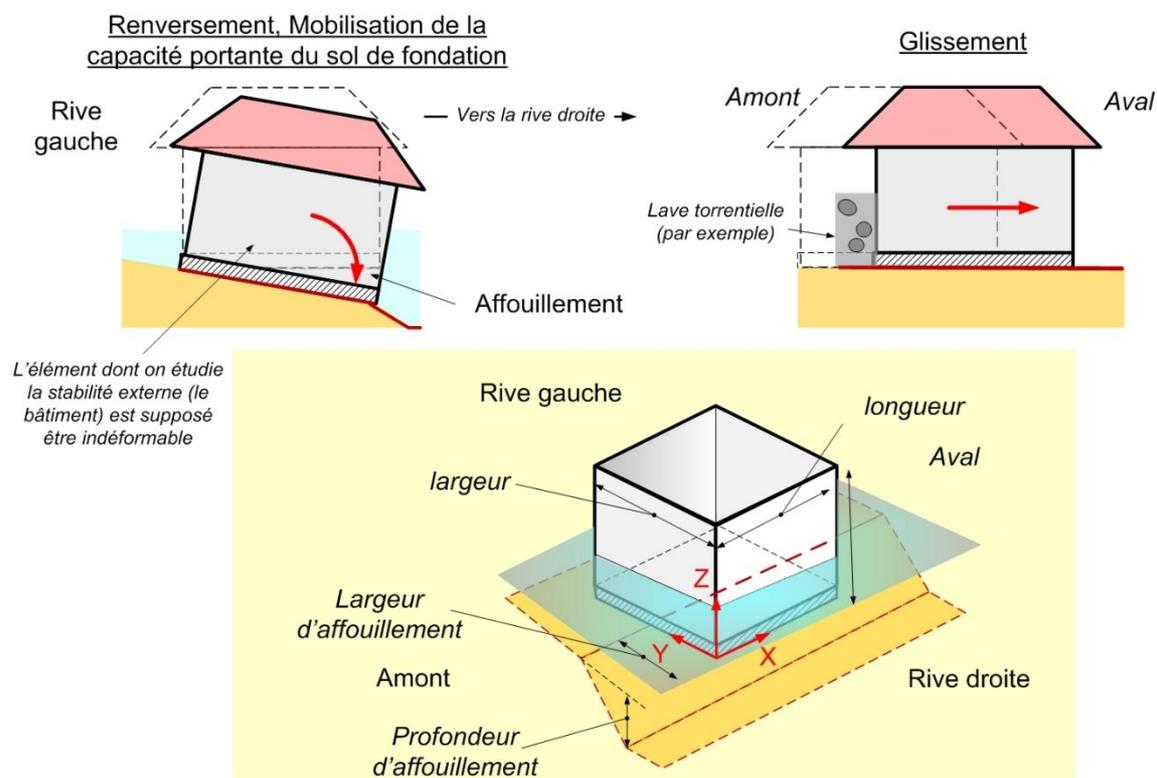


**Défaut de stabilité interne :** les matériaux et composants de la structure peuvent se déformer jusqu'à la rupture

INRAE I. Ousset/ J.-M. Tacnet

Figure 1 : Notions de stabilité externe et interne

Dans le contexte d'un bâtiment soumis à un affouillement, on va s'intéresser à la vérification d'équilibres de renversement, glissement et mobilisation de la capacité portante en fondation (Figure 2).



INRAE I. Ousset/ J.-M. Tacnet

Figure 2 : Exemples de défauts de stabilité externe

Pour une structure de type bâtiment, la suppression d'appui en fondation va pouvoir générer des ruptures dans le gros oeuvre (fondations, murs) mais aussi sur les équipements de second oeuvre (ouvertures). L'analyse de la stabilité interne nécessite de décomposer la structure en éléments associés à des modèles mécaniques (poutre, plaque, etc.) dont on va ensuite analyser le comportement (Figure 3).

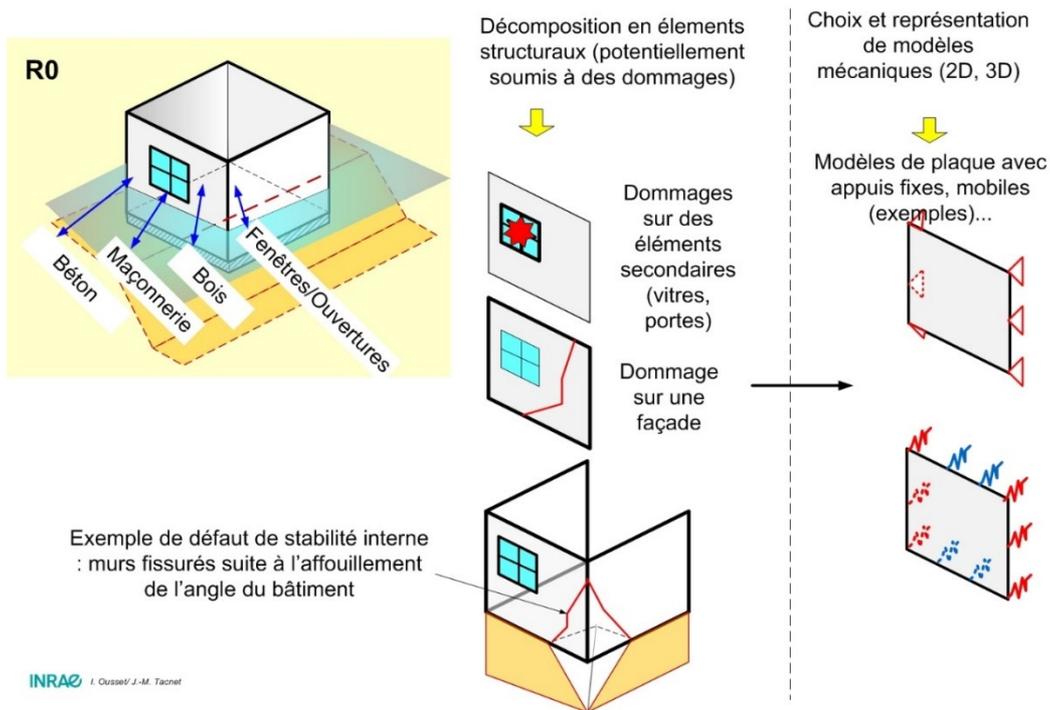


Figure 3 : Exemples de défauts de stabilité interne et exemples de décomposition en éléments structuraux, de modèles mécaniques associés

## 2.2. Phénomènes torrentiels, effets et cas de charges

Les phénomènes torrentiels induisent plusieurs types d'effet pouvant chacun être déclinés en termes d'aléas (phénomène caractérisé en termes d'intensité et de fréquence). On distingue ainsi la submersion, le déjaugage d'une structure légère (cas d'une crue en eau claire), l'engravement, l'impact (crue avec transport solide, flottants) et enfin l'affouillement possible pour l'ensemble des types de crue torrentielles (Figure 4).

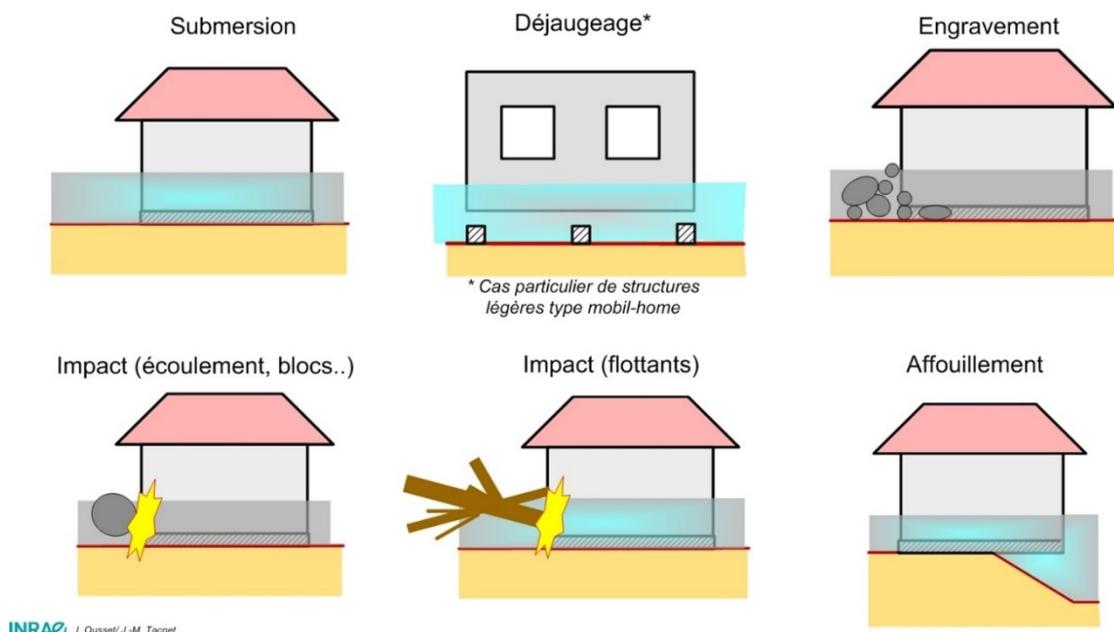


Figure 4 : Effets des phénomènes torrentiels sur un bâtiment

Ces phénomènes et leurs effets sont combinés pour produire des (scénarios de) cas des charges servant à la justification des stabilités externe et interne des structures (Figure 5).

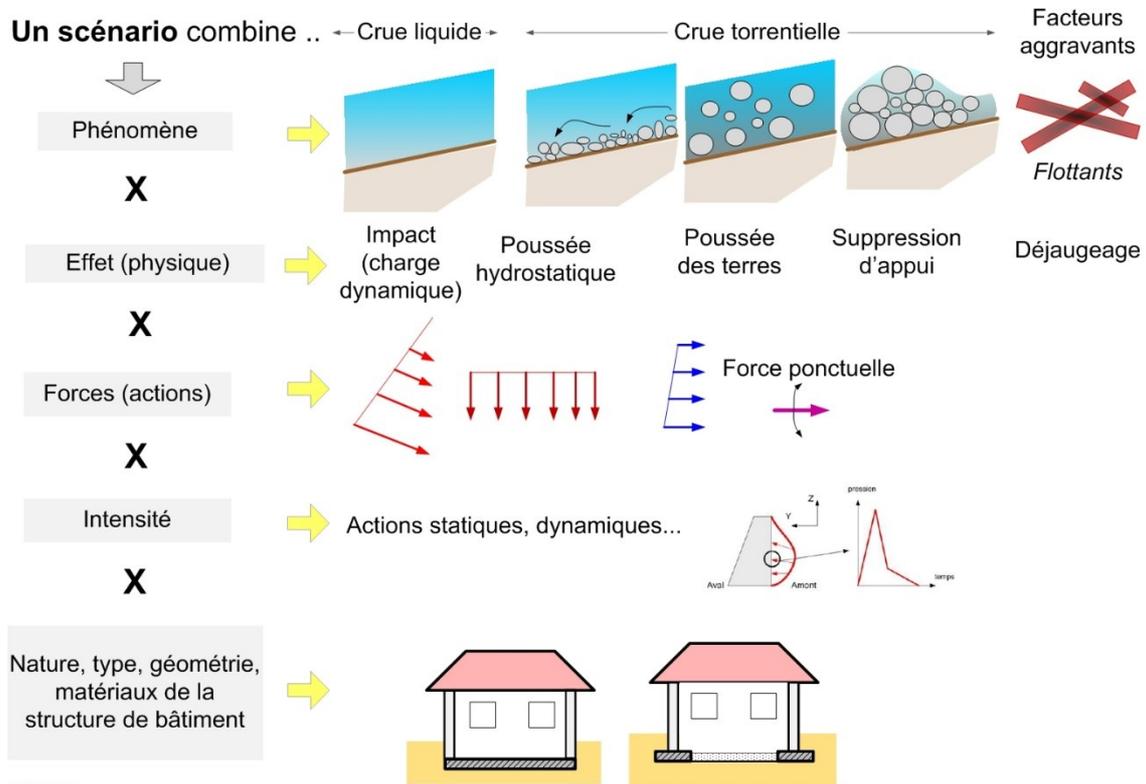


Figure 5 : Un scénario de cas de charges combine la nature du phénomène, des effets, des actions, leur intensité et la nature de la structure concernée.

Les actions exercées sur la structure sont, quant à elles, différenciées en plusieurs catégories correspondant à ce qu'on appelle des charges permanentes, transitoires (ou d'exploitation) et des charges accidentelles. Dans les domaines des ouvrages de génie civil courants (bâtiments, ouvrages d'art, ponts...), les charges à prendre en compte sont spécifiées, quantifiées explicitement. Les cas de charge correspondant à des situations durables (charges permanentes), transitoires ou caractéristiques (charges permanentes et charges d'exploitation) ou accidentelles (charges accidentelles) sont clairement définies.

Choisir les cas de charges affectant un bâtiment constitue une difficulté à la frontière entre le domaine de l'ingénierie des ouvrages de protection et des bâtiments. Dans le domaine des ouvrages de protection tels que, par exemple, les barrages de correction torrentielle, c'est le concepteur qui choisit le cas de charge et sa qualification en fonction du contexte (Tacnet & Degoutte 2013). Une crue de forte intensité pourra très bien être considérée comme une charge d'exploitation si elle survient souvent ou bien accidentelle si elle est rare. Connaître la probabilité associée à l'intensité permet évidemment d'éclairer ce choix mais la fréquence des événements n'est pas toujours connue par les concepteurs, les obligeant souvent à faire des hypothèses. La question se complique dès lors qu'on s'intéresse à des bâtiments soumis aux effets des crues torrentielles. Ce ne sont en effet pas des ouvrages de protection et considérer qu'une fondation va être affouillée est contre-nature. Il y a donc une ambiguïté et une sorte de vide réglementaire pour ces structures exposées à des phénomènes naturels.

## 2.3. Composants du risque

De nombreuses références bibliographiques existent pour définir le concept de risque dans le domaine des risques naturels. Les analyses dans le domaine des risques (phénomènes) naturels et des (incidents, accidents) technologiques sont souvent dissociées car elles correspondent à des communautés différentes. En pratique, cette dichotomie s'avérera bien souvent artificielle car les composants restent les mêmes mais regroupés de manière différente aléa x vulnérabilité pour le domaine

naturel et fréquence x gravité dans le domaine technologique (Figure 6).

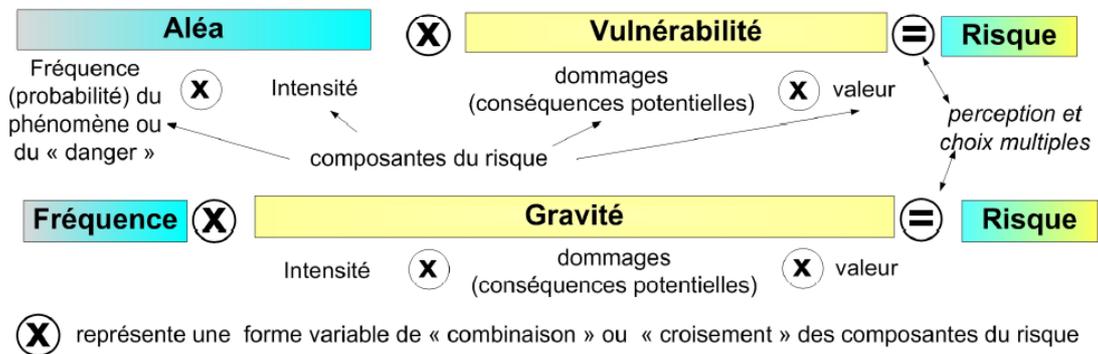


Figure 6 : Représentation simplifiée des composants du risque dans le domaine des risques naturels et industriels (Tacnet 2009)

Les terminologies peuvent être variables d'un contexte à l'autre. Le GIECC considère l'aléa, la vulnérabilité et l'exposition (Figure 7).

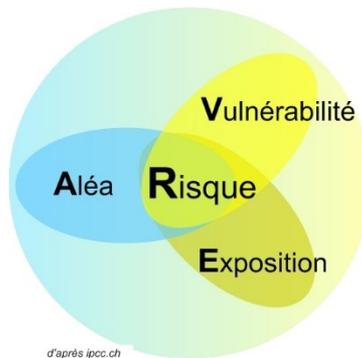


Figure 7 : Modèle de risque utilisé par le GIECC (en français) ou IPCC (en anglais) - <https://www.ipcc.ch/>

Dans le domaine de l'analyse de risque des risques torrentiels (Figure 8 Figure 8 : Composants du risque, adapté d'après Tacnet 2009), le terme de vulnérabilité correspond à un concept de potentiel de dommages ou de pertes intégrant aussi la notion de valeur.

Elle est obtenue par croisement de l'intensité d'un phénomène avec le taux d'endommagement d'un certain type d'enjeu auquel on attribue une valeur. On fait donc une différence entre endommagement (pourcentage de destruction) et dommages (valeur de la destruction, perte). La combinaison entre le type d'enjeu, le nombre d'enjeux et leur valeur représente l'exposition. Le terme de vulnérabilité parfois utilisé dans le contexte d'une approche de génie civil (au lieu d'endommagement) a un sens différent du terme utilisé dans le cadre d'analyse de risque (au sens IPCC, GIEC où il est question d'aléa, d'exposition et de vulnérabilité). Dans ce rapport, la contribution portera sur l'amélioration de la connaissance de la courbe (du potentiel) d'endommagement en introduisant aussi une notion d'incertitude au travers d'une probabilité de défaillance (courbe de fragilité).

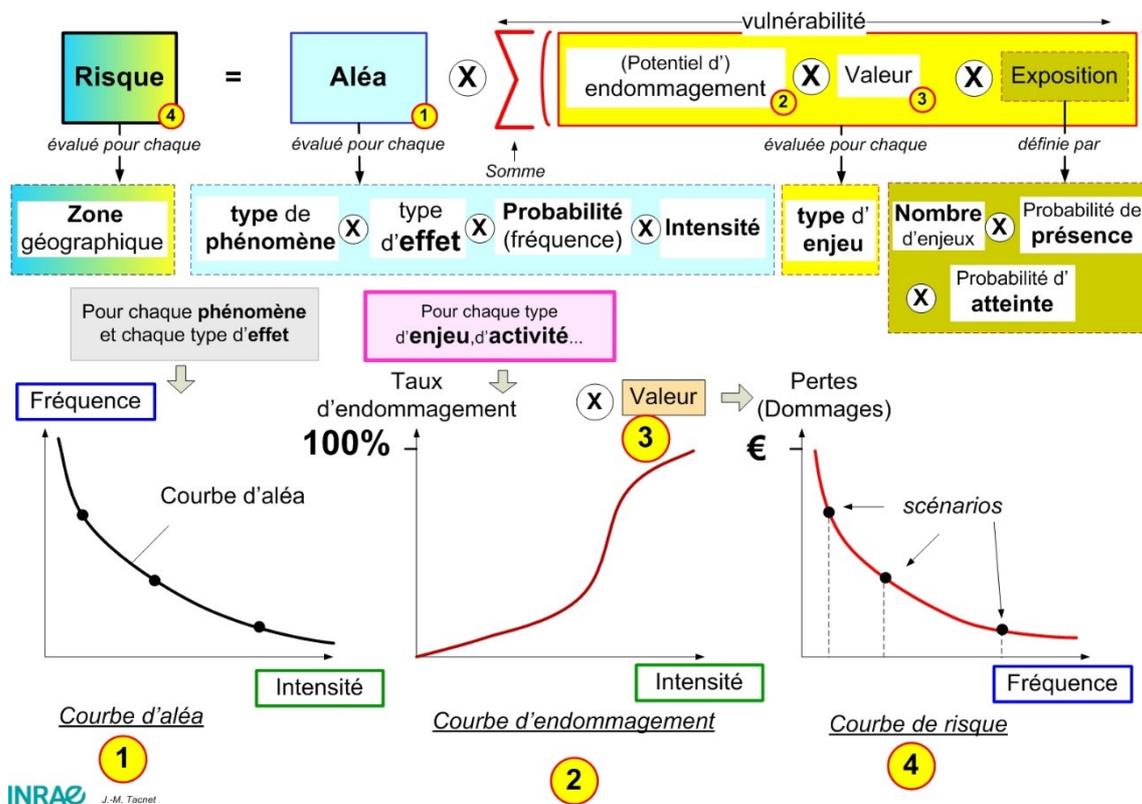


Figure 8 : Composants du risque, adapté d'après (Tacnet 2009)

## 2.4. Notions de courbes de vulnérabilité et de fragilité

Quand une structure quelconque est soumise à des actions externes croissantes (traduites en sollicitations par applications de coefficients de sécurité multiplicateurs), elle va progressivement générer des contraintes croissantes sur ses appuis (stabilité externe) et voir ses matériaux constitutifs être soumis à des contraintes et déformations croissantes (stabilité interne). L'augmentation des contraintes va croître, endommageant la structure jusqu'à ce qu'on aura défini comme étant un seuil de rupture. La courbe qui relie l'intensité de l'action exercée avec le taux d'endommagement de la structure est appelée courbe de vulnérabilité. Dans ce rapport, les courbes de vulnérabilité correspondent donc à des courbes d'endommagement physique : telle action induit tel dommage.

Ces courbes de vulnérabilité se réfèrent à un seuil de rupture et il peut y avoir plusieurs contextes. Il est nécessaire de définir des indicateurs factuels, structurels du niveau de dommage. C'est là où une analyse mécanique, structurale prend tout son intérêt. Elle vise à identifier à quel stade on peut considérer que la structure est défaillante. Les justifications des structures font, par exemple, référence à des seuils correspondant à différents états limites qualifiés d'états limites de service ou ultimes. Les états limites de service visent à vérifier que la structure va, tout au long de sa durée de vie, pouvoir résister et ne pas s'endommager. Pour une construction en béton armé, ceci consiste, par exemple, à vérifier que les contraintes ne vont pas engendrer de déformations et de fissurations susceptibles de favoriser l'entrée d'eau dans la structure pouvant à terme engendrer des phénomènes de corrosion et donc menacer sa durabilité. Sur un autre plan, les états limites ultimes vérifient que la structure va résister quitte à être endommagée et devoir être réparée par la suite. Les fissures vont s'ouvrir, la structure va se déformer mais elle ne va pas rompre.

Différents coefficients de pondération sont associés à ces types d'états limites :

- Dans le cas des états limites de service, on va considérer les actions réelles mais limiter par hypothèse les capacités

mécaniques des matériaux en autorisant par exemple une valeur de contrainte dans les armatures du béton armé plus faible que ce qu'elle pourrait normalement accepter. Calculée de la sorte, la structure ne sera pas ou peu fissurée selon des contextes qualifiés de fissuration préjudiciable ou très préjudiciable ;

- Dans le cas des états limites ultimes, on considère les actions habituelles majorées (les actions exceptionnelles ne sont pas majorées) mais on va accepter de s'approcher des capacités mécaniques limites réelles des matériaux.

La notion de seuil d'endommagement (de rupture) à prendre en compte pour définir des courbes de vulnérabilité et de fragilité est donc essentielle. La courbe de vulnérabilité permet de relier l'intensité d'un effet associé à un phénomène (submersion, impact, affouillement) à un taux d'endommagement.

La stabilité de l'ouvrage va dépendre de la sollicitation mais aussi de la conception de la structure, ses matériaux, le contexte géotechnique. On peut imaginer que les paramètres pris en compte pour effectuer les calculs ne sont pas entièrement connus de manière précise ou certaine. Les justifications de la stabilité vont donc se baser sur des données que l'on va pouvoir connaître, déterminer avec plus ou moins de précision et d'incertitude. La profondeur de l'affouillement peut par exemple être envisagée entre des seuils minimaux et maximaux. La nature des matériaux de construction d'une maison peut être inconnue et ses propriétés peuvent avoir été dégradées au cours du temps.

Pour prendre en compte cette imperfection de l'information sur les données d'entrée du calcul, on va construire ce qu'on appelle des courbes de fragilité. On va calculer non pas un seuil de défaillance mais une probabilité de défaillance représentée dans ce qu'on appelle des courbes dites de fragilité. Des distributions de probabilité (ou de possibilité) vont être associées aux caractéristiques des matériaux, aux actions pour obtenir non pas un taux d'endommagement mais la probabilité de dépasser le seuil de rupture considéré en fonction de l'incertitude sur les paramètres d'entrée. Ces approches combinent des approches structurales et probabilistes. Elles sont généralement assez complexes à mettre en œuvre mais des travaux récents ont proposé des cadres accessibles et utilisables pour les praticiens. Ce sont ces méthodes que le projet utilise et applique à la problématique d'analyse de l'endommagement des structures en contexte torrentiel.

## **3. Etape 1 : choix des configurations types de bâtiment et d'affouillement**

### **3.1. Typologie et géométrie des fondations**

Il existe plusieurs types de fondation dont on effectue la justification en terme de stabilité externe. En relation avec leur profondeur d'encastrement, on distingue les fondations superficielles, semi-profondes et profondes différenciées entre elles en fonction du rapport D/B (D étant la profondeur d'encastrement de la fondation et B la largeur de la semelle de fondation)(Figure 9).

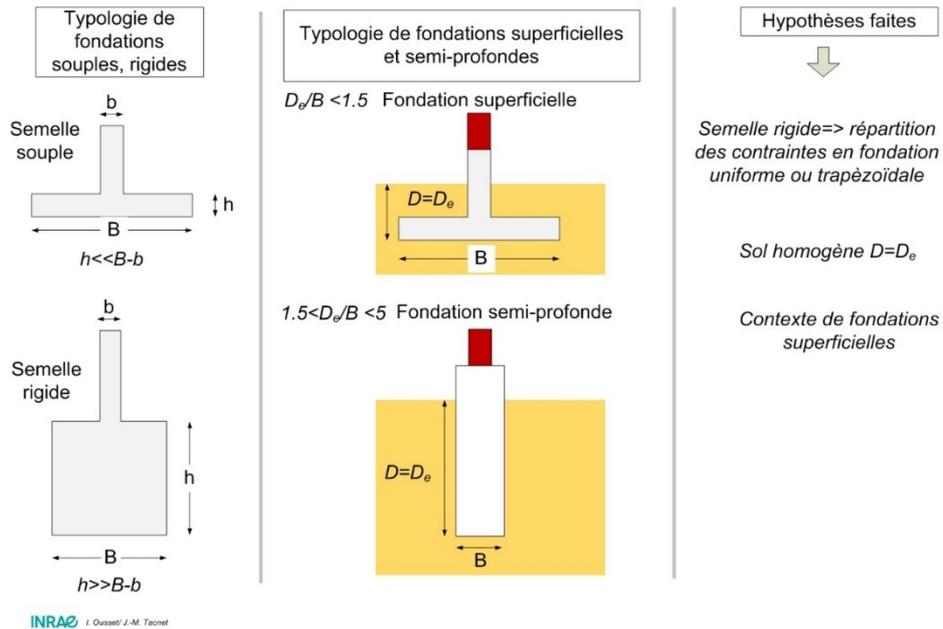


Figure 9 : Typologie de fondations souples, rigides, superficielles et semi-profondes

Pour un bâtiment, il existe plusieurs types de fondations caractérisées par leur forme et leur niveau d'encastrement. On distingue notamment (Figure 10), les fondations sur radier (superficiel, profond ou enterré), les fondations sur semelles filantes, les fondations sur plots et enfin les fondations sur pieux.

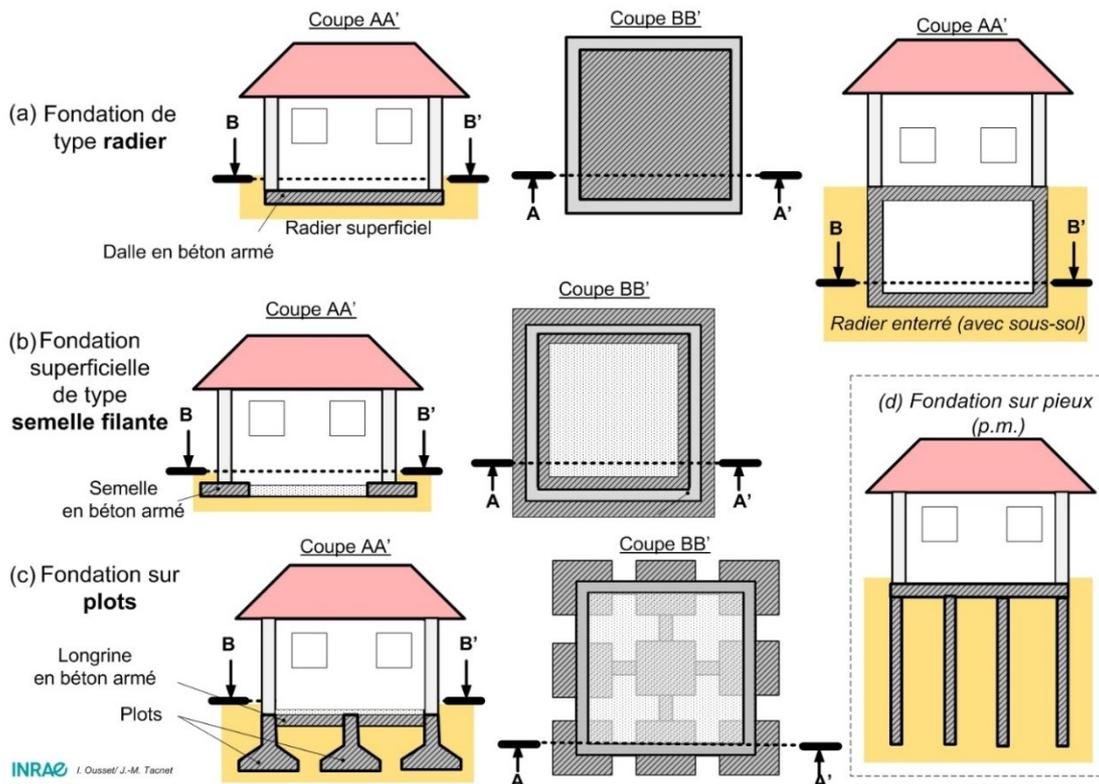


Figure 10 : Types de fondation sur radier (a), semelle filante (b), plots (c) ou pieux (d)

Le choix d'un type de fondation dépend évidemment toujours de la nature du sol. Certains types de fondations peuvent néanmoins être associés à des natures de bâtiments et des gammes de hauteurs. Le Tableau 1 ci-dessous propose une classification indicative des associations les plus courantes entre des types de bâtiment et de fondation en fonction du nombre d'étages.

Types de fondation	R0 (plain-pied)	R+1	R+2	R+3	>R+3
Fondations superficielles (semelles filantes)	++	+	-	-	-
Semelle filante et vide sanitaire (inaccessible)	++	++	- (rare)	-	-
Fondations sur longrines et plots	-  (possible mais rare)	-	++	++	+++
Fondation sur pieux	-	=  (cas spéciaux)	+	++	
Fondation sur radier superficiel	=	=	+	+	+
Fondation sur radier semi enterré	=	=	=	=	=
Fondation sur radier enterré R-1		+	++	++	++

Tableau 1 : Correspondance entre type de fondation et nombre d'étages pour des bâtiments d'habitation

Les configurations de fondations superficielles correspondant à des semelles filantes et à un radier sont les deux cas principaux retenus par la suite. Elles sont respectivement décrites aux Figure 11 et Figure 12.

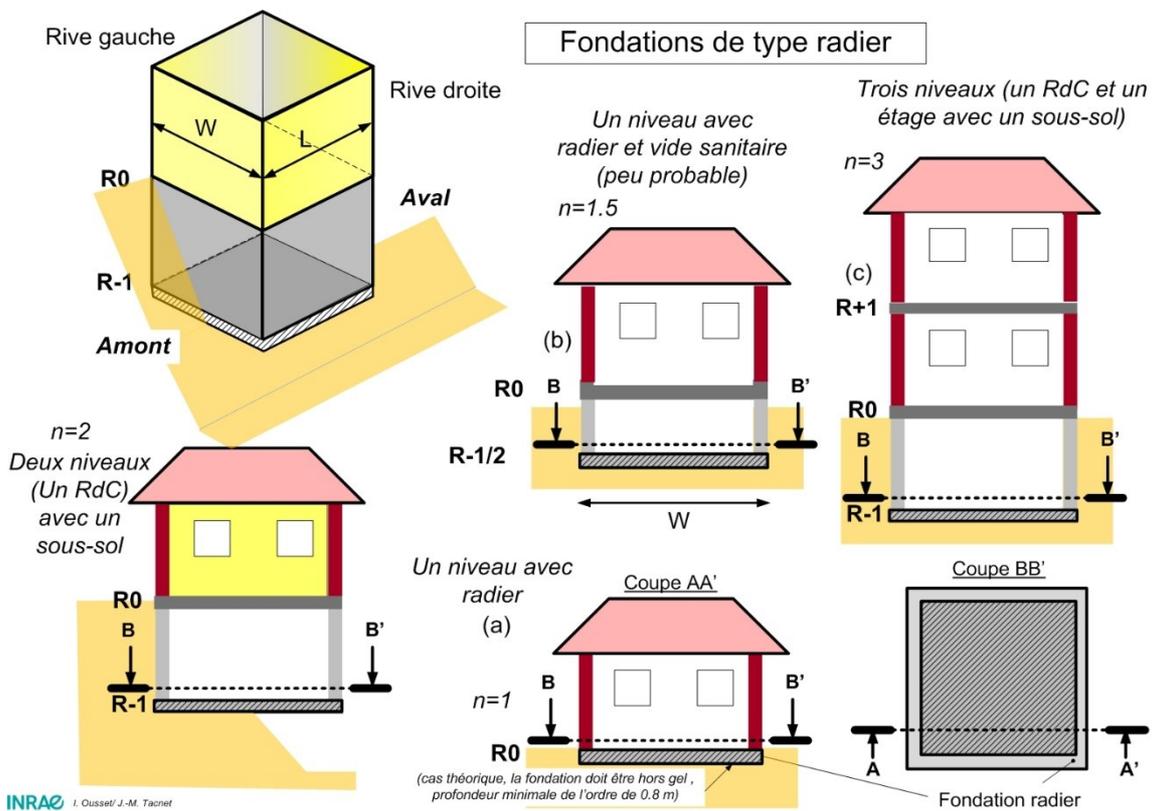


Figure 11 : Exemples de configurations de différents type de radier superficiel (a), semi-enterré avec vide sanitaire (b), enterré (c)

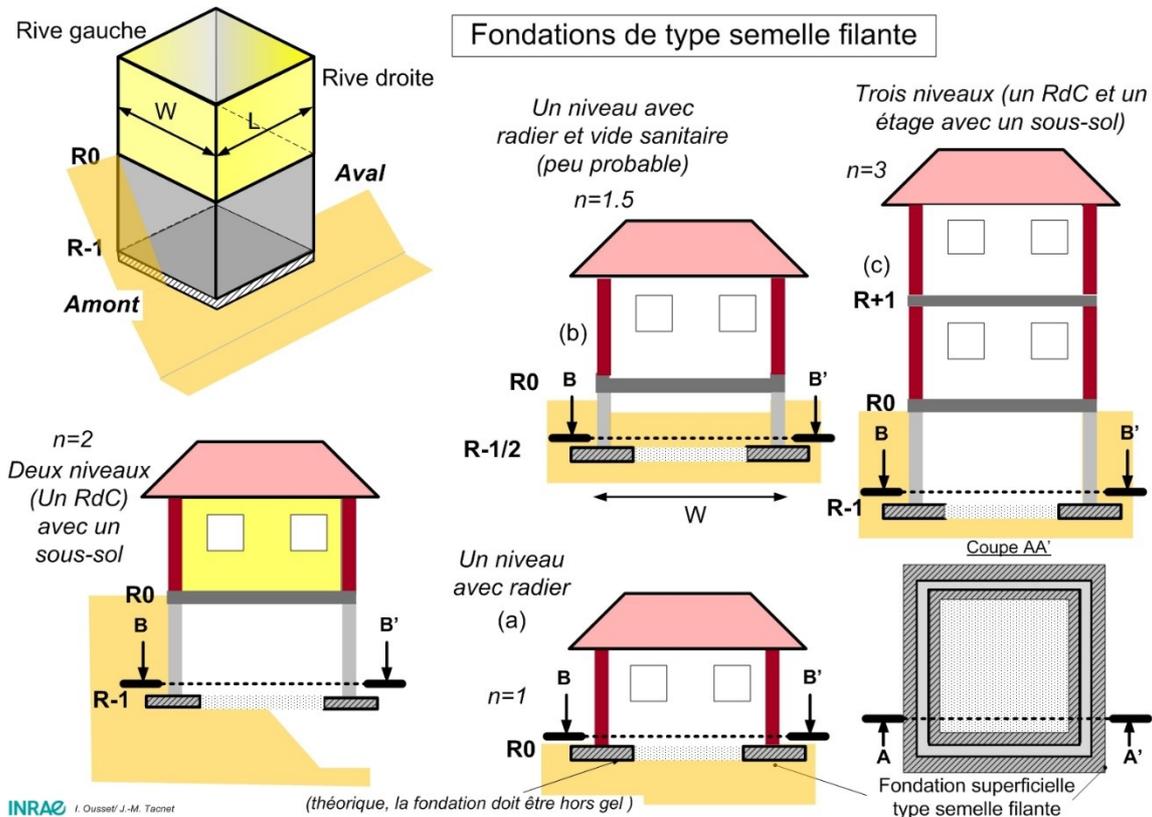


Figure 12 : Exemples de configurations de différents type de semelles filantes superficielles (a), semi-enterrées avec vide sanitaire (b), enterrées (c)

## 3.2. Géométries des bâtiments retenues

L'analyse d'évènements récents permet d'identifier quelques caractéristiques de bâtiments ayant été affouillés (ONF-RTM & INRAE 2022). Dans ce cadre, pour les décrire, on s'intéresse notamment à leur nombre, type (individuel, collectif), à leur nombre d'étages, à leurs dimensions au sol, aux surfaces par niveau, au type de fondation, aux matériaux de construction, à l'orientation par rapport au sens de l'écoulement.

### 3.2.1. Bâtiments avec fondation de type semelle filante

Les configurations considérées se limitent à des bâtiments soit de plain-pied ou à un étage. Les composants des bâtiments sont décrits à la Figure 13. Les notations des données géométriques sont définies à la Figure 14. Les figures correspondent à une description réaliste des épaisseurs des murs et des planchers, associée à un calcul de leur poids de manière volumique. Les calculs de vulnérabilité effectués plus loin se baseront sur une hypothèse simplificatrice de prise en compte d'un poids surfacique.

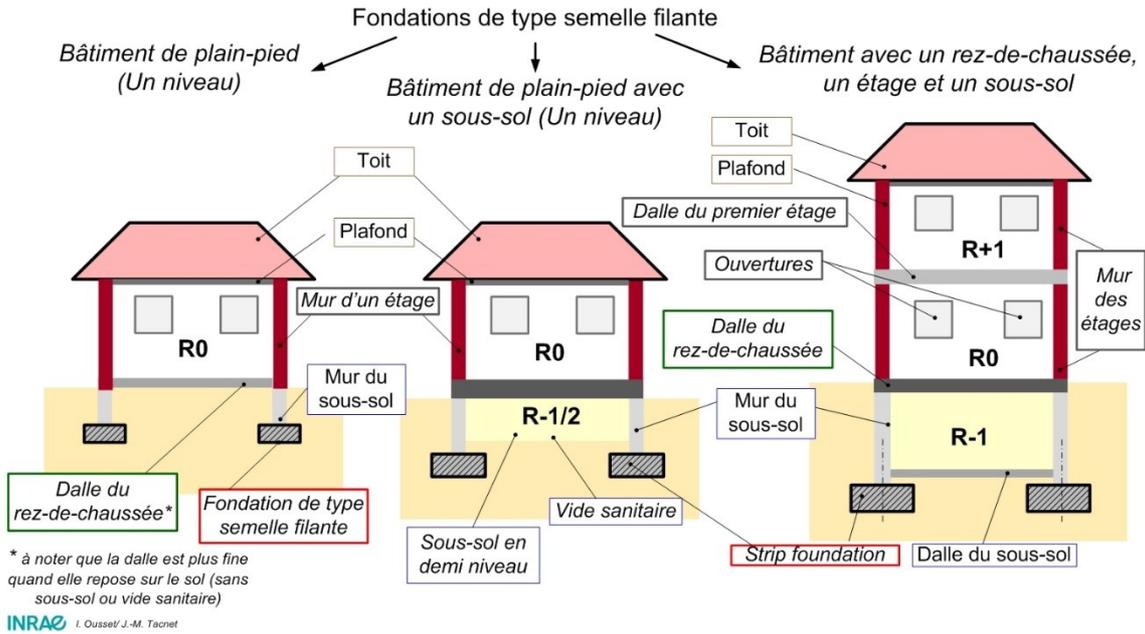


Figure 13 : Configuration de bâtiment avec fondation de type semelle filante (plain-pied ou avec un étage) : description des composants du bâtiment

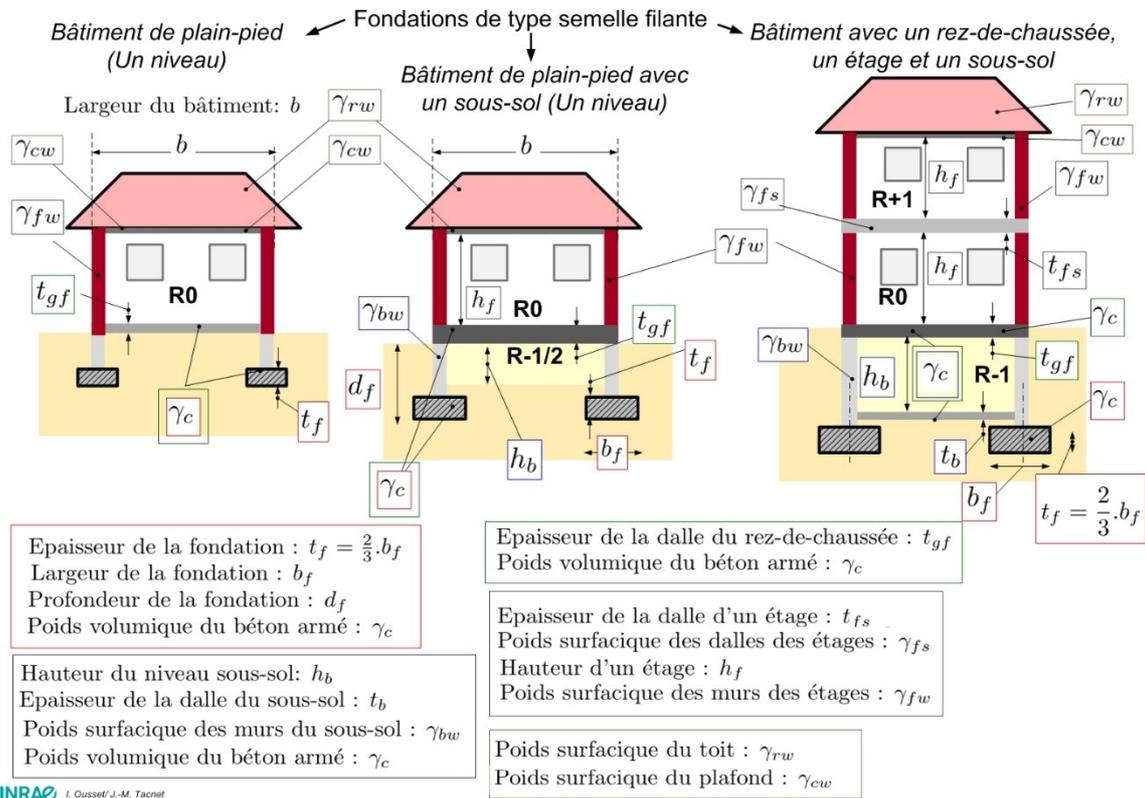
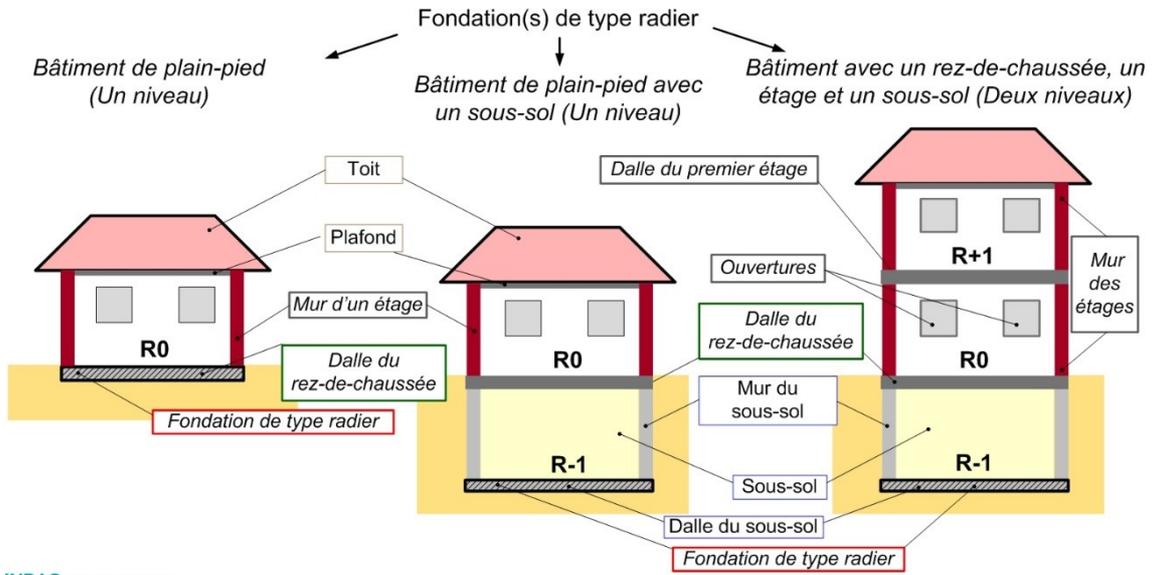


Figure 14 : Configuration de bâtiment avec fondation de type semelle filante (plain-pied ou avec un étage) : données géométriques et notations

### 3.2.1. Bâtiments avec fondation de type radier

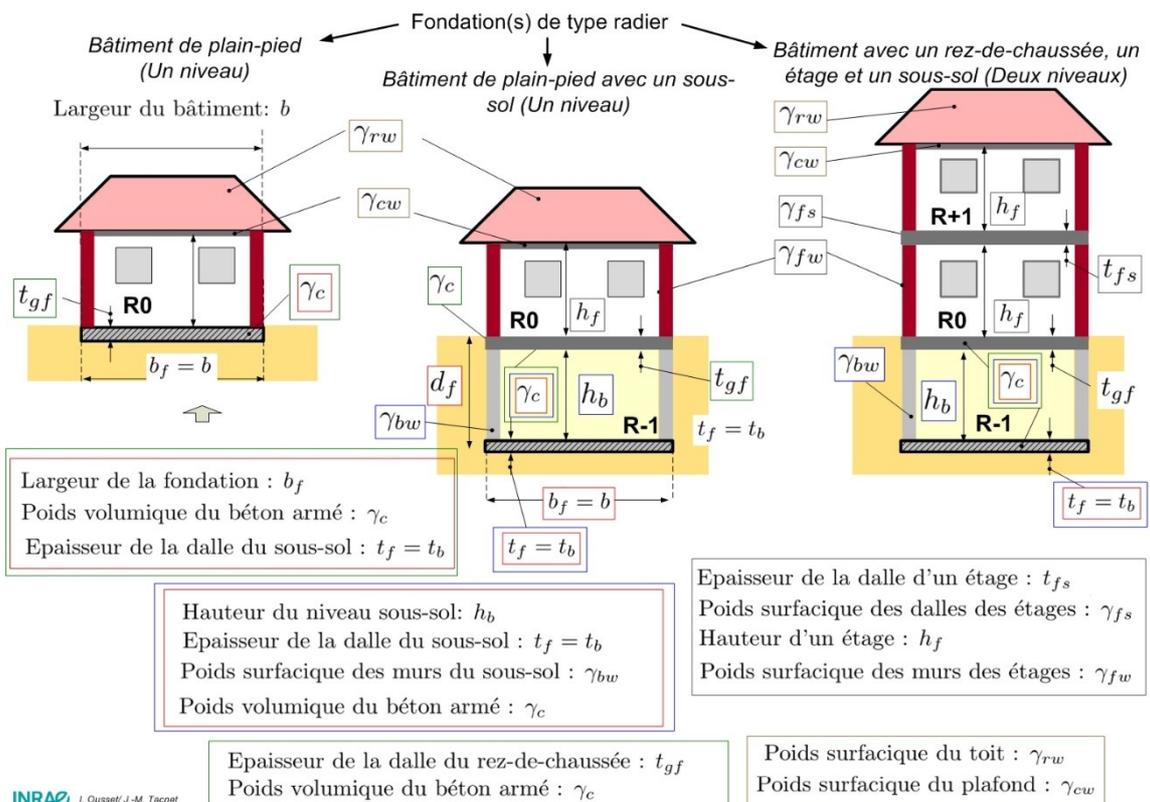
Les configurations considérées se limitent à des bâtiments de plain-pied ou à un étage, avec ou sans sous-sol. Les composants des bâtiments sont décrits à la Figure 15. En montagne, il faut noter que la première configuration sera plus

rare dans la mesure où la fondation doit être hors gel ce qui suppose que la face inférieure du radier se situe à une profondeur minimum de l'ordre de 0.8m en moyenne. Les notations des données géométriques sont définies à la Figure 16. Comme pour les semelles filantes, les figures correspondent à une description réaliste des épaisseurs des murs et des planchers, associée à un calcul de leur poids de manière volumique. Les calculs de vulnérabilité effectués plus loin se baseront sur une hypothèse simplificatrice de prise en compte d'un poids surfacique.



INRAE I. Oussef/ J.-M. Tacnet

Figure 15 : Configuration de bâtiment avec fondation de type radier (plain-pied avec un sous-sol , avec un étage et un sous-sol) : description des composants du bâtiment



INRAE I. Oussef/ J.-M. Tacnet

Figure 16 : Configuration de bâtiment avec fondation de type radier (plain-pied avec un sous-sol , avec un étage et un sous-sol) : données géométriques et notations

### 3.3. Configurations et scénarios d'affouillement

Plusieurs configurations d'affouillement sont possibles. On peut distinguer les cas où l'affouillement est qualifié de monodirectionnel (Figure 20) et se fait sur toute la longueur (L) ou largeur (W) de la fondation et les cas où l'affouillement ne concerne qu'un angle de la fondation (Figure 19).



Figure 17 : Dégâts post tempête Alex 2 Octobre 2020 (Saint Dalmas de Tende, Vallon de Bieugne, Vallée de la Roya) – crédit : ONF/RTM - voir aussi (ONF-RTM & INRAE 2022)



(a)



(b)

Figure 18 : Dégâts post tempête Alex 2 Octobre 2020 (Tende, Vallée de la Roya) – crédit : ONF/RTM - (ONF-RTM & INRAE 2022)

Ces différentes configurations d'affouillement correspondent à une complexité de calcul croissante (Figure 19).

- Le premier cas (affouillement sur toute la longueur  $L$  de la fondation) est le plus simple. Il permet de se ramener à un calcul monodimensionnel (avec une seule valeur d'excentricité) ;
- Les autres cas correspondent à des configurations d'affouillement bidimensionnelles avec un affouillement dans le sens de longueur noté  $L_s$  et un affouillement dans le sens de la largeur noté  $W_s$ . Par simplification, seule l'hypothèse d'un affouillement rectangulaire est considéré.

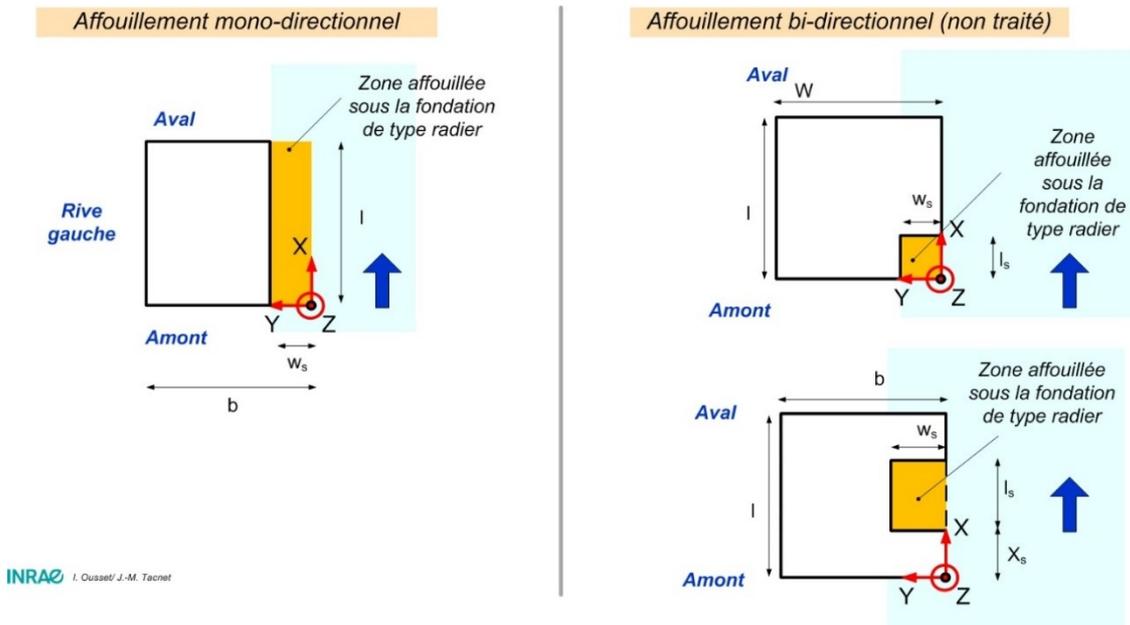


Figure 19 : Configurations d'affouillement mono- et bi-dimensionnelles

L'affouillement monodimensionnel peut concerner une géométrie de fondation de type radier ou bien semelle filante (Figure 20).

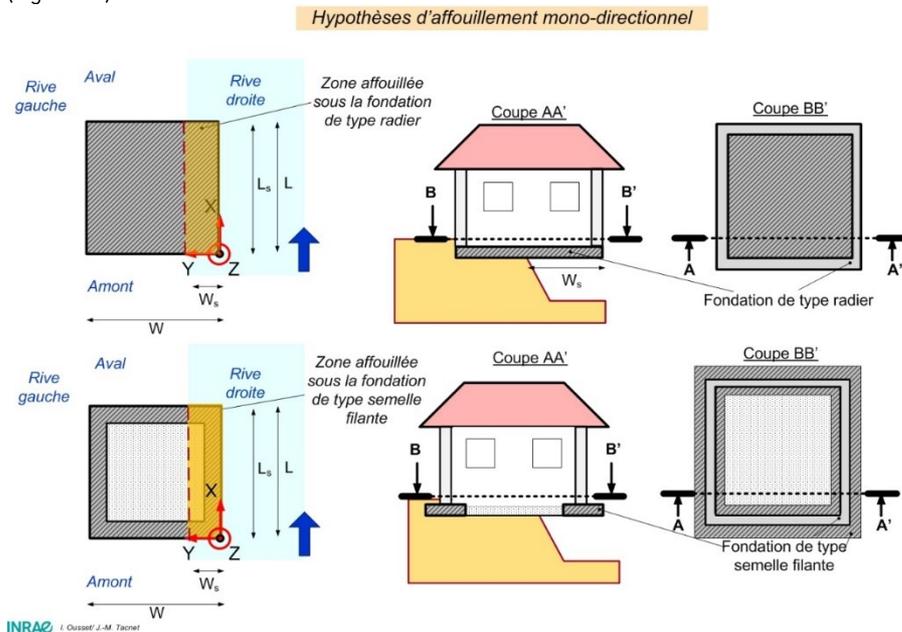


Figure 20 : Configurations d'affouillement mono-dimensionnel sous une fondation de type radier et sous une fondation de type fondation superficielle

Les différentes notations et le repère adoptés pour les calculs sont indiqués à la Figure 21.

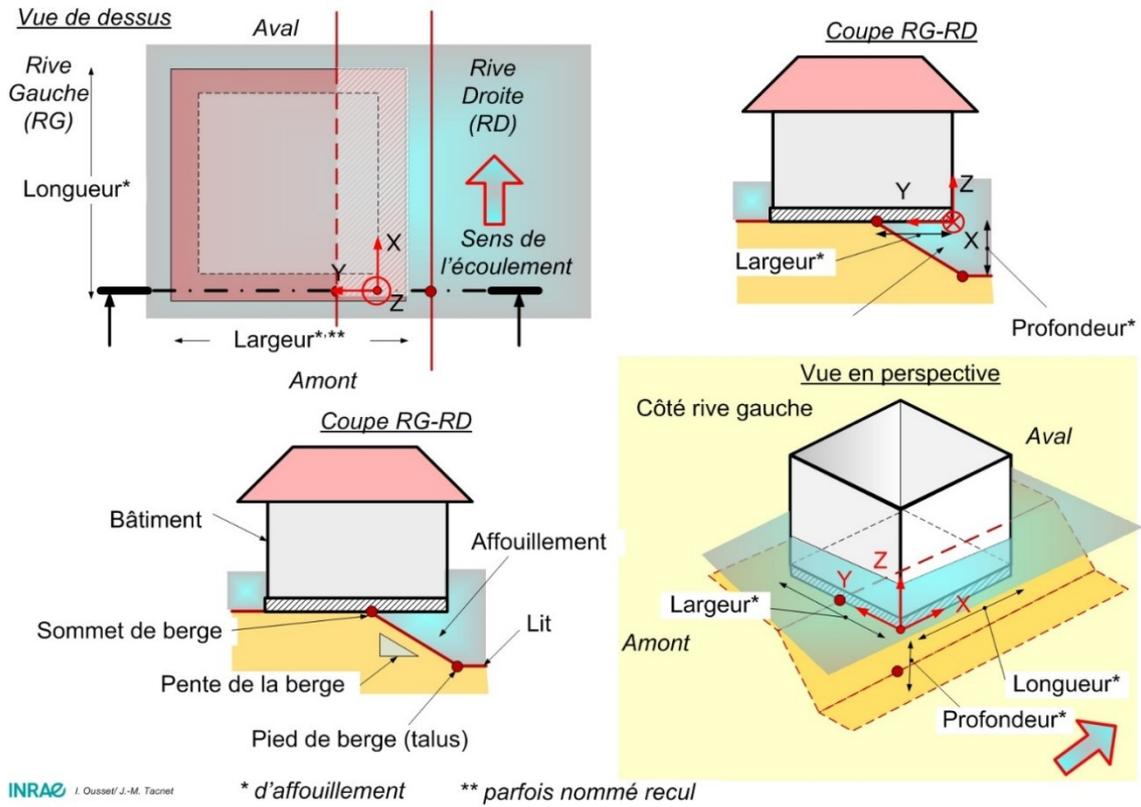


Figure 21 : Principes des notations adoptées pour décrire la géométrie des configurations d'affouillement

L'affouillement des fondations va résulter de l'évolution morphodynamique du lit torrentiel par combinaison de phases d'incision verticale et d'érosion latérale. Des exemples de scénarios possibles sont donnés aux Figure 22 et Figure 23.

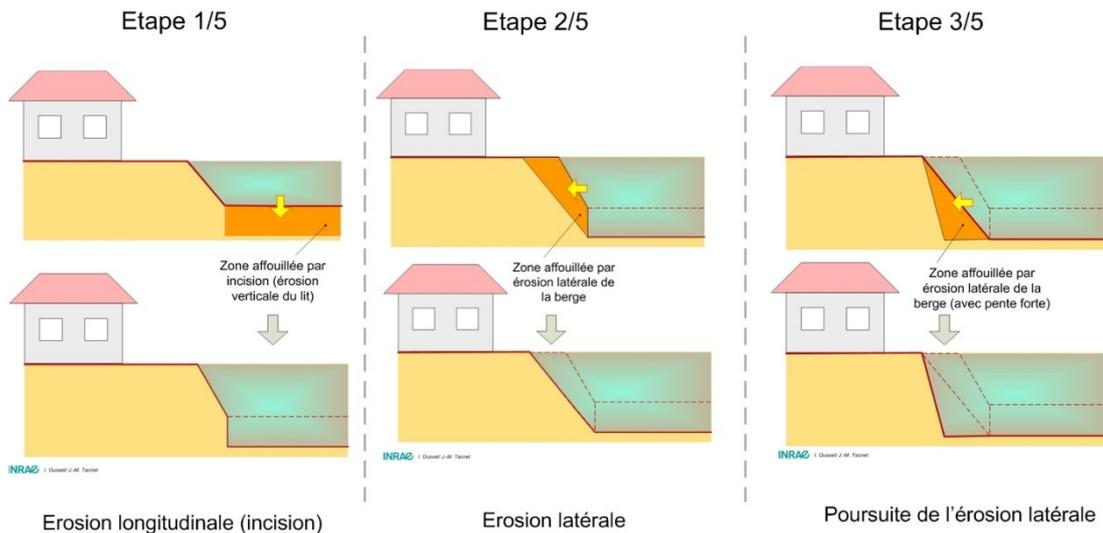


Figure 22 : Exemple de scénario d'évolution d'un lit torrentiel pouvant conduire à l'affouillement de fondations de bâtiments situés sur les berges (1/2)

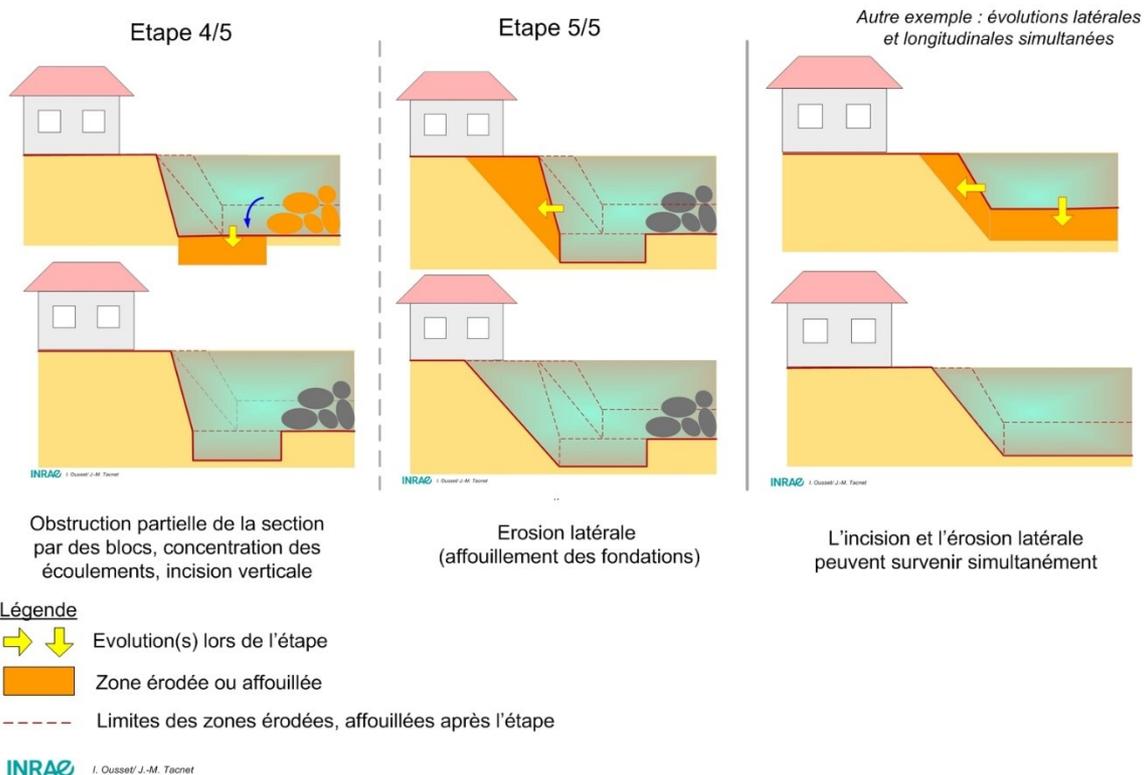


Figure 23 : Exemple de scénario d'évolution d'un lit torrentiel pouvant conduire à l'affouillement de fondations de bâtiments situés sur les berges (2/2)

## 4. Etape 2 : développement de modèles de stabilité externe avec affouillement

Etudier l'hypothèse d'affouillement de la fondation d'un bâtiment, d'un ouvrage d'art n'est pas courant dans le domaine du génie civil. Ce genre de configuration correspond en effet à une situation généralement rédhitoire que les concepteurs vont plutôt chercher à éviter, en choisissant un autre site ou en adoptant des dispositions constructives permettant de supprimer cette menace. Etudier la stabilité d'une structure dont la fondation ne joue plus son rôle est donc assez peu courant et reste peu traité dans la littérature.

### 4.1. Données géométriques de l'affouillement des fondations

Les calculs de fondation classiques correspondent logiquement à des contextes où l'ensemble de la surface de la semelle de fondation est en contact avec le sol. La problématique de l'affouillement est considérée par exemple dans le cas des ouvrages d'art implantés en site hydraulique où l'érosion va causer une suppression d'appui en fondation. Considérer une telle hypothèse (de suppression d'appui) n'est cependant pas une approche courante en génie civil et les modèles de calcul ne prennent généralement pas en compte ces cas-là.

Le calcul de la largeur de fondation affouillée va dépendre de la position du pied de berge, de la hauteur d'affouillement et de la pente du talus d'affouillement. Plusieurs configurations sont possibles : hauteur d'affouillement et pente de talus

d'affouillement faibles, hauteur et pentes fortes, ... (Figure 24). La valeur de la largeur d'affouillement est une donnée d'entrée essentielle pour les calculs de stabilité externe.

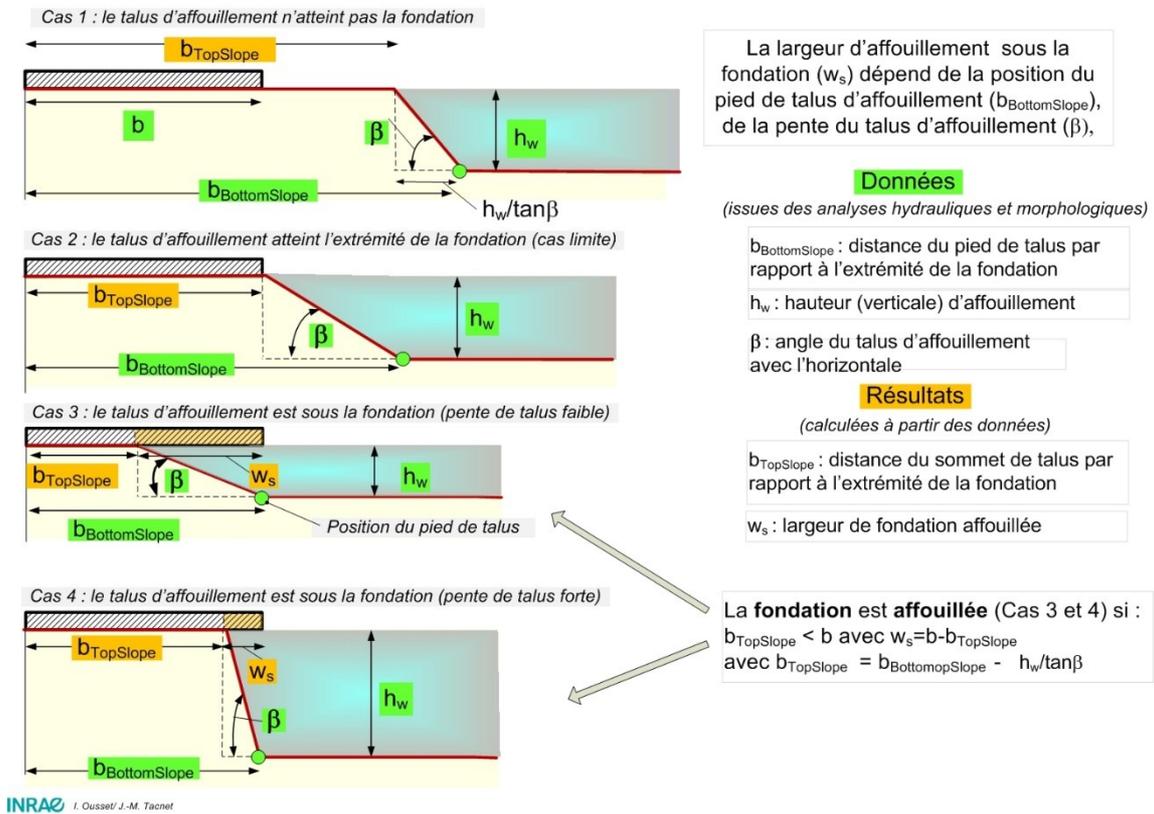


Figure 24 : La proximité d'un talus par rapport à une fondation réduit la capacité portante du sol à considérer dans les calculs.

Un bâtiment situé à proximité d'une berge affouillée va correspondre à une configuration de fondation implantée à proximité de talus. La proximité du talus par rapport à la fondation induit une réduction de la contrainte admissible prise en compte dans les calculs de stabilité par l'application de coefficients de minoration ( $i_{\beta}$ ) de la contrainte admissible dans les calculs de justification (Figure 25).

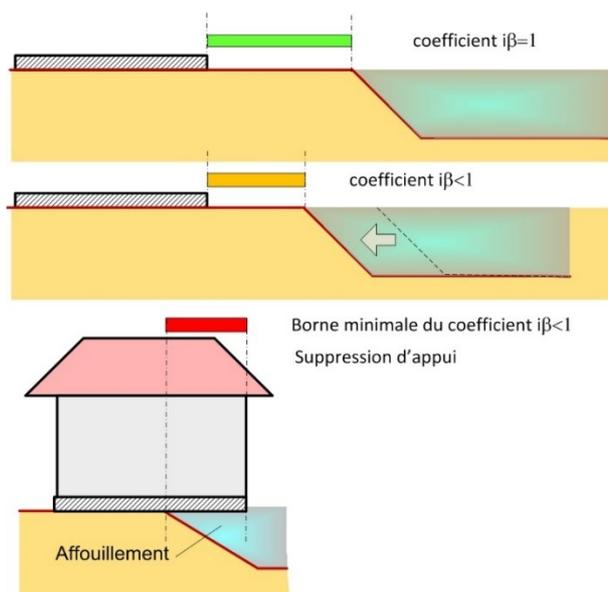
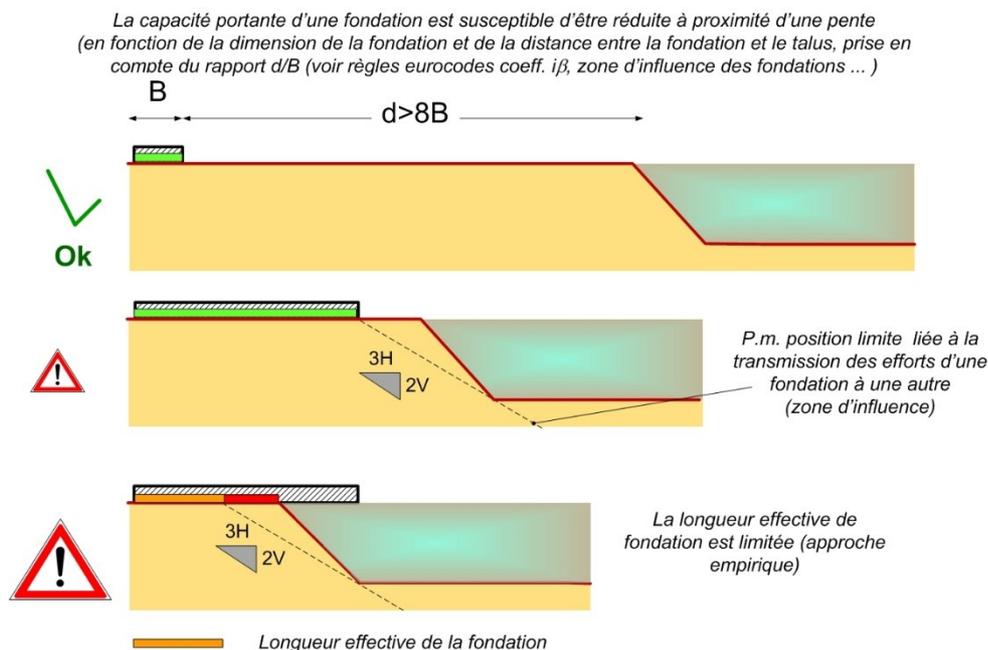


Figure 25 : La proximité d'un talus va réduire la capacité portante des fondations : une analyse qualitative de l'exposition des bâtiments est envisageable a priori.

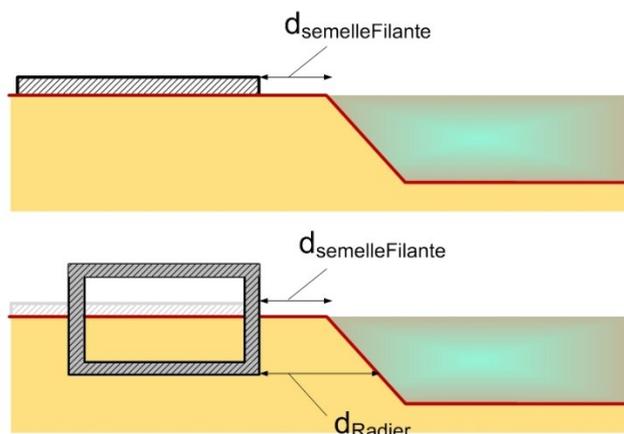
Au delà des aspects calculatoires, il existe des distances minimales qui doivent normalement être respectées lors de l'implantation de fondations à proximité de talus en prenant, par exemple, l'hypothèse d'un angle de talus maximal admissible correspondant à une pente. En disposant d'informations sur le nombre d'étages des bâtiments, le type de fondation et en faisant une hypothèse sur la position du pied de talus, sa pente et la profondeur d'affouillement, on peut déjà, de manière pragmatique et sans aucun calcul de génie civil, proposer un pré zonage des bâtiments susceptibles d'être menacés par l'affouillement (Figure 26, Figure 25).



INRAE I. Oussel/ J.-M. Tacnet

Figure 26 : Des règles empiriques peuvent, sans calcul, permettre de prédéterminer la sensibilité de bâtiments au phénomène d'affouillement.

Une distinction et une première analyse peuvent également être faites en fonction de la nature superficielle, semi-profonde ou profonde des fondations. Par exemple, une fondation sur radier avec un niveau en sous-sol sera, de fait, moins sensible qu'une fondation superficielle de type semelle filante (Figure 27). Au final, le type de fondation et la distance à la berge sont des premiers indicateurs de la susceptibilité à l'affouillement.



*En cas de radier enterré (présence de sous-sol), la portance du sol est moins réduite. Par simplification, on considère la capacité portante constante mais en réalité, elle augmente avec la profondeur => les effets positifs se cumulent*

INRAE I. Oussel/ J.-M. Tacnet

Figure 27 : Une fondation de type radier enterré est moins sensible en cas d'affouillement

A partir du moment où la géométrie de la zone affouillée sous la fondation a été déterminée, on peut procéder à la justification de la stabilité externe.

## 4.2. Principes généraux de justification de la stabilité externe dans un contexte d'affouillement des fondations

Plusieurs questions sont posées pour justifier la stabilité externe d'un bâtiment avec hypothèse d'affouillement des fondations :

- Quelle est la contrainte exercée sous la fondation dans l'hypothèse d'un affouillement partiel de la fondation soumise à une charge verticale excentrée dans deux directions (flexion composée) ?
- Quelle est la répartition de ces contraintes sous la fondation affouillée ?
- Quelle est la contrainte de référence à prendre en compte dans les calculs ?
- Peut-on imaginer une fondation équivalente permettant de simplifier les calculs ?
- Quel modèle de répartition simplifié peut être imaginé et utilisé dans un contexte de stabilité externe ou interne ? Comment vérifier que le modèle est représentatif de la réalité ?
- Comment transposer les configurations de justification des fondations en lien avec un pourcentage de fondation comprimée au cas d'une fondation partiellement affouillée ?
- Comment mettre en oeuvre pratiquement la démarche de calcul ?

Dans le cadre d'un bâtiment soumis uniquement à des charges verticales, le glissement n'existe pas et seuls les équilibres de renversement et de mobilisation du sol en fondation doivent être vérifiés. Le poids est équilibré par la réaction du sol au niveau des fondations. Cette réaction du sol se traduit par une répartition de contraintes verticales.

### Principes de calcul des contraintes en fondation

Pour une fondation classique en contact avec le sol, on calcule les contraintes en fondation en fonction de l'excentricité  $e$  et de la résultante des forces  $R$ . Cette résultante est équilibrée par la réaction du sol en fondation que l'on représente de deux manières :

- La première correspond à un modèle dit de Navier associé à une répartition de contraintes triangulaire ou trapézoïdale, selon l'excentricité de la résultante (modèle classique de résistance des matériaux assimilant le sol sous la fondation à une poutre soumise à une flexion composée) ;
- La seconde correspond à un modèle dit de Meyerhof basé sur une valeur de contrainte uniforme.

A noter que la longueur de semelle comprimée dans un modèle de Meyerhof n'a pas de signification physique (elle n'est pas représentative de la longueur effectivement comprimée). Le modèle de Meyerhof n'est qu'un modèle de calcul. Un modèle de Navier permet, quant à lui, d'accéder à la longueur de fondation réellement comprimée sous la fondation.

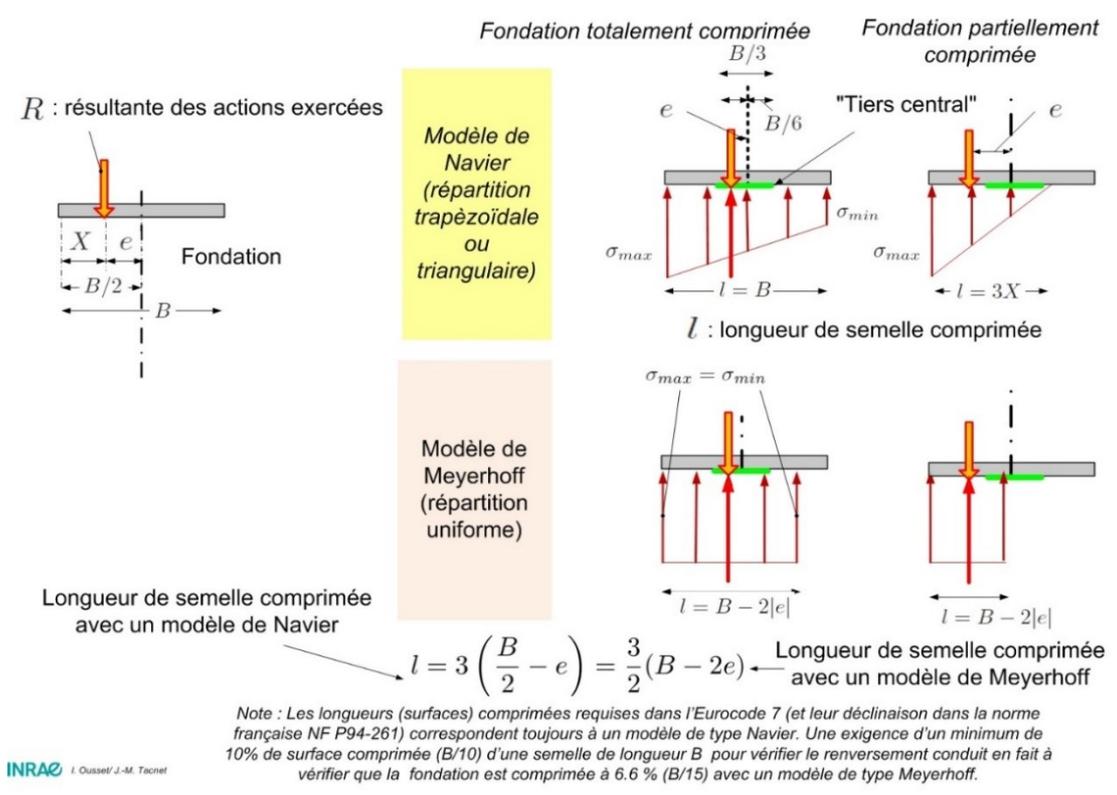


Figure 28 : Modèle de répartition des contraintes en fondation de type Navier et Meyerhoff

Un affouillement partiel de la fondation va réduire la longueur de la fondation en contact avec le sol et créer une excentricité qui va s'appliquer au poids propre du bâtiment. Il va donc falloir recalculer la fondation sur la base de la géométrie réduite de la fondation et en considérant l'excentricité générée par la réduction de section (Figure 29).

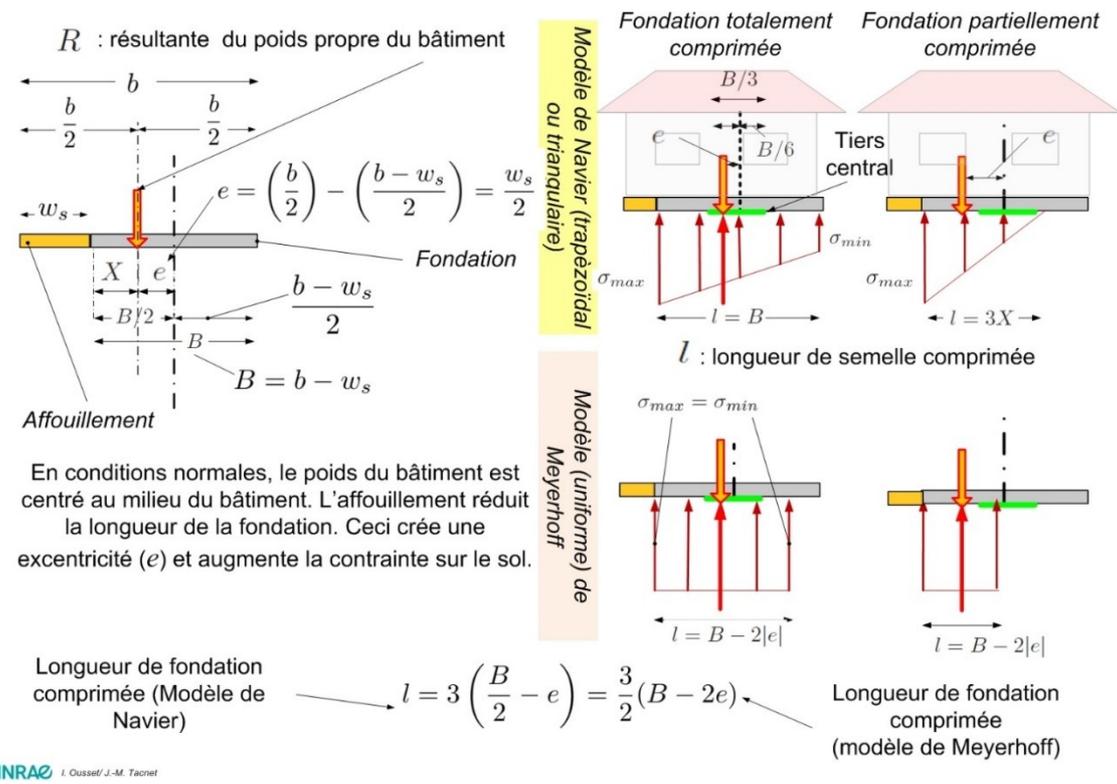


Figure 29 : Calcul de l'excentricité d'une fondation affouillée et comparaison entre les surfaces comprimées sous la fondation déterminées avec les modèles de répartition de contraintes en fondation de type Navier (forme trapézoïdale ou triangulaire) et Meyerhoff (contrainte uniforme).

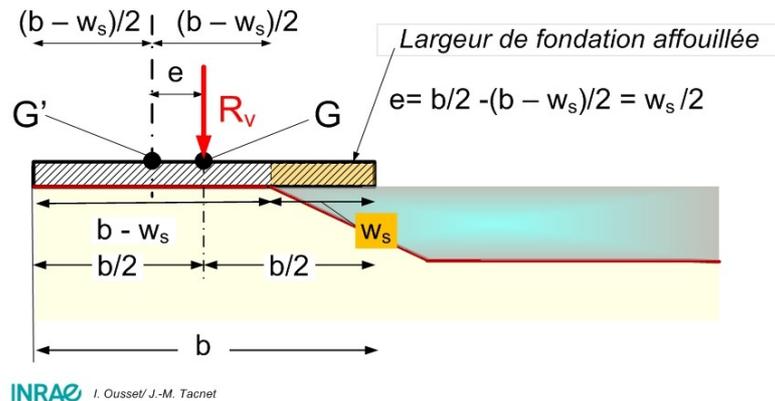


Figure 30 : Calcul de l'excentricité résultant de l'affouillement d'une fondation

## 4.3. Cas d'affouillement monodimensionnel

### 4.3.1. Cas d'une fondation de type radier – affouillement monodimensionnel

La démarche consiste à faire l'hypothèse d'une répartition de contraintes uniforme sous la fondation (modèle de Meyerhof) puis à remplacer la fondation initiale affouillée par une fondation équivalente de même forme que la fondation initiale et avec le même centre de gravité que la fondation affouillée.

Les étapes de la démarche globale d'analyse de la stabilité externe d'une fondation affouillée est la suivante :

- Définition de la géométrie du bâtiment ;
- Définition de la géométrie de la fondation ;
- Définition des cas de charge ;
- Définition de la zone affouillée ;
- Calcul du centre de gravité de la fondation affouillée ;
- Calcul d'une fondation fictive équivalente : cette fondation a la même forme que la fondation ;
- Calcul de la contrainte de référence exercée par la fondation sur le sol ;
- Le cas échéant, calcul de la répartition réelle des contraintes en fondations.

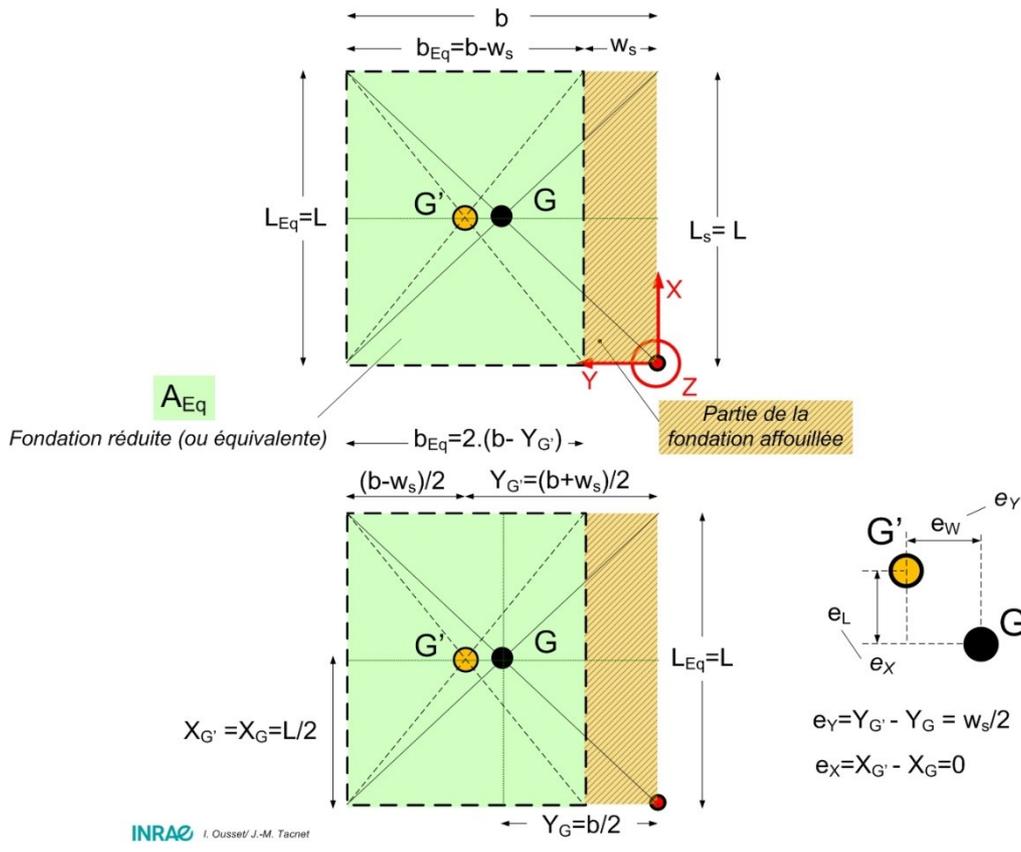


Figure 31 : Calcul de la surface réduite (équivalente) et des coordonnées du centre de gravité d'une fondation de type radier affouillée dans une contexte monodimensionnel (sur toute la longueur L)

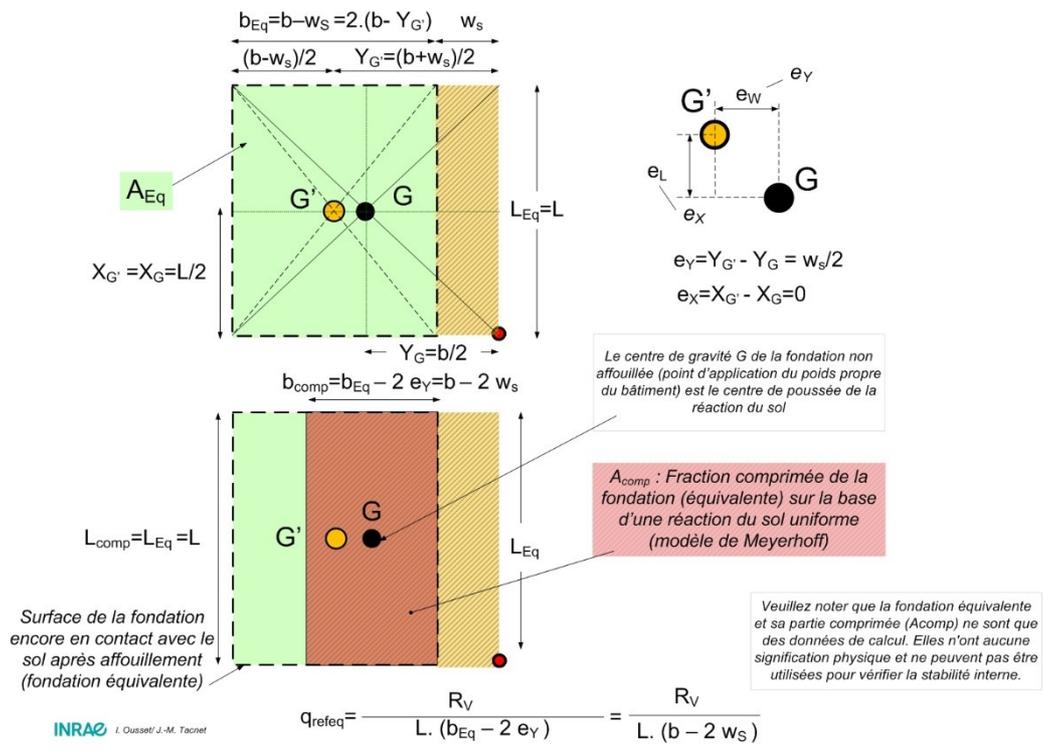


Figure 32 : Calcul de la contrainte de réaction du sol selon le modèle de Meyerhoff (réaction uniforme) dans le cas d'un radier affouillé de manière monodimensionnelle

## 4.3.2. Cas d'une fondation filante superficielle – affouillement monodimensionnel

Pour calculer la contrainte en fondation, il faut connaître la valeur de la surface comprimée. Dans le cas d'une fondation superficielle de type semelle filante, on ne peut pas utiliser directement les formules analytiques correspondant à des formes de fondation rectangulaire. On reste dans le cadre d'un affouillement sur toute la longueur ( $L$ ) de la fondation. On fait varier la largeur d'affouillement  $w_s$  et on cherche quelle serait la forme de la répartition de contraintes équivalente.

Différentes configurations d'affouillement sont possibles en fonction de cette largeur d'affouillement  $w_s$ . Les configurations géométriques et les notations sont définies sur les figures ci-dessous (Figure 33, Figure 34, Figure 35, Figure 36). Pour calculer la contrainte exercée par la fondation du bâtiment sur le sol ( $q_{ref}$ ), il faut déterminer la surface comprimée. La première solution consiste à utiliser le modèle de Navier et à déterminer la répartition de contraintes réelle au contact de la fondation (forme trapézoïdale ou triangulaire). Ceci nécessite de calculer la position du centre de gravité de la fondation affouillée, son inertie et ensuite de localiser le centre de poussée. L'approche proposée est plus simple. On fait l'hypothèse d'une répartition de contraintes uniforme en suivant le modèle de Meyerhof. Comme pour une fondation de type radier, il faut garder à l'esprit que cette répartition reste un modèle de calcul qui ne représente pas la répartition réelle des contraintes en fondation. Dans le cas d'une semelle partiellement comprimée correspondant à une répartition des contraintes triangulaire avec un modèle de Navier, la surface comprimée dans le modèle de Meyerhof représentera, par exemple, les  $2/3$  de la surface comprimée du modèle de Navier (voir Figure 29).

La résultante due aux actions n'a qu'une composante verticale. La résultante de réaction du sol doit s'appliquer au point d'application des charges verticales, soit au niveau du centre de gravité de la structure. La répartition des contraintes en fondation doit ainsi être telle que le centre de poussée soit confondu avec le centre de gravité de la structure. Ceci permet, avec l'hypothèse simplificatrice d'une contrainte en fondation uniforme, par simple considération géométrique, de définir quelle est la surface comprimée (Figure 33). La détermination de la surface comprimée proposée ci-dessous en adoptant un modèle de Meyerhof repose sur des considérations purement géométriques de statique externe. Pour qu'un solide supposé indéformable soit en équilibre, il faut que les sommes des forces agissant sur lui et des moments de ces forces soient nulles. Dans le cas d'un bâtiment, la résultante des forces est verticale et s'applique au point G. Pour avoir un équilibre, il faut donc que la résultante des contraintes de réaction du sol de fondation s'applique également au niveau de ce point G.

Du fait de l'hypothèse d'uniformité des contraintes dans le cadre du modèle de Meyerhof, ceci implique également une condition de symétrie : la répartition des contraintes doit forcément être symétrique par rapport au point G dans le sens de la largeur et de la longueur de la fondation. Sur la base de ces considérations, la surface comprimée peut être déterminée sans calcul. Les figures ci-dessous décrivent ces surfaces comprimées pour des largeurs d'affouillement ( $w_s$ ) croissantes. Plusieurs cas sont analysés :

- Dans le premier cas (Figure 33), la largeur d'affouillement est strictement inférieure à la largeur de la fondation  $b_f$ ;
- Le second cas constitue la valeur limite supérieure du cas précédent avec  $b_f = w_s$  (Figure 34) ;
- Le troisième cas correspond à une largeur d'affouillement supérieure à la largeur de la fondation (Figure 35) mais inférieure à la valeur limite au-delà de laquelle il est impossible d'assurer la stabilité (Figure 36).
- Le quatrième cas correspond à un cas physiquement impossible (la largeur d'affouillement est supérieure à la moitié de la largeur totale de la fondation) (Figure 36).

La détermination de la forme de la répartition des contraintes en fondation se fait ici sur l'hypothèse d'une contrainte uniforme (type Meyerhof) et sur la base de principes de symétrie décrits ci-dessus qu'il n'est plus possible d'appliquer dès que l'affouillement a une forme plus complexe (dans un angle, sur une partie de la fondation de semelle filante). Dans ce cas, il est nécessaire de revenir à un calcul des contraintes réelles de type Navier. Ceci nécessite de calculer tout d'abord le centre de gravité de la section puis de calculer l'inertie par rapport aux axes principaux puis les contraintes dans les deux

directions en fonction des valeurs d'excentricité  $e_x$  et  $e_y$ . Les principes de calcul des centres de gravité dans ce cas sont donnés à titre indicatif en annexe.

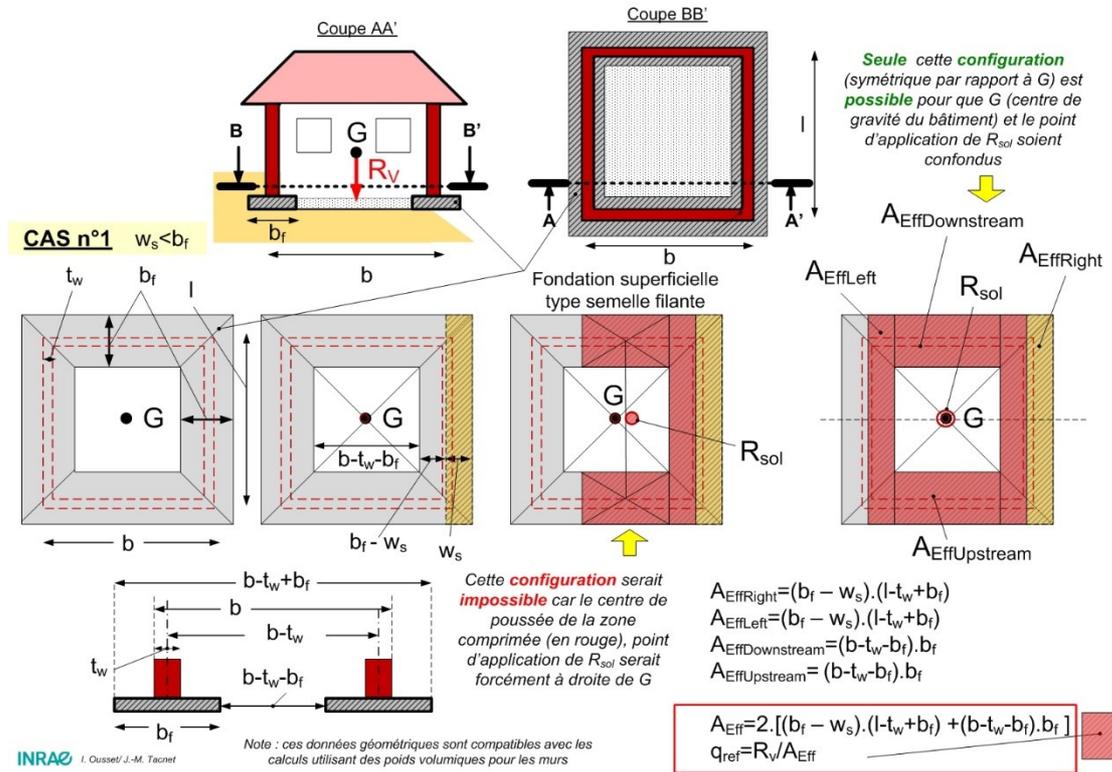


Figure 33 : Analyse graphique du positionnement du centre de poussée de la réaction du sol en fondation (cas n°1)

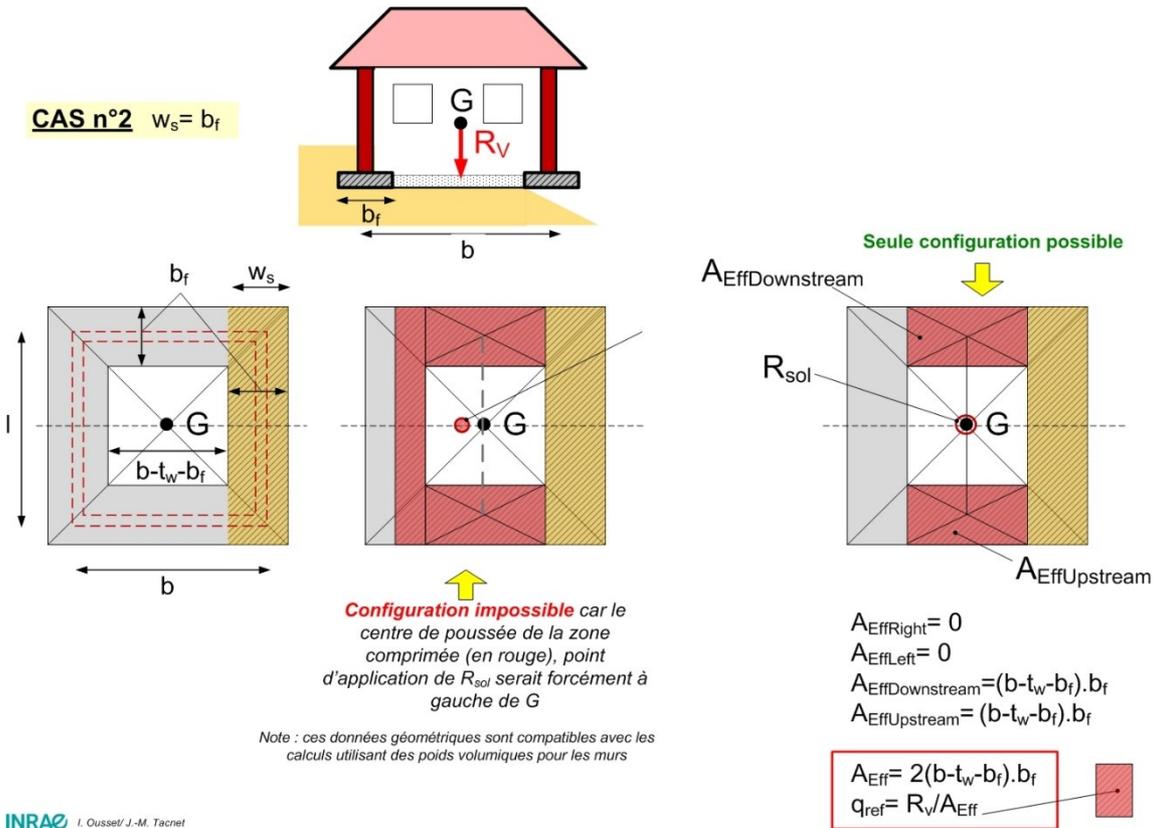


Figure 34 : Analyse graphique du positionnement du centre de poussée de la réaction du sol en fondation (cas n°2)

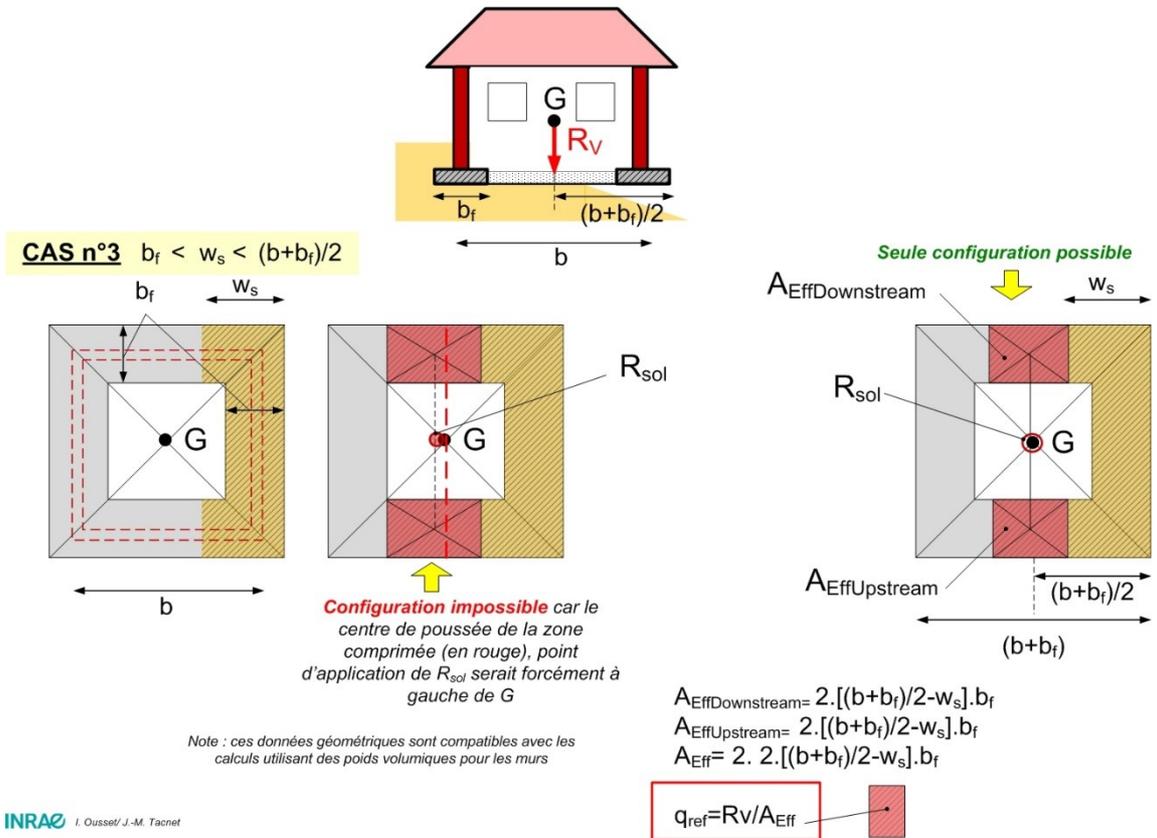
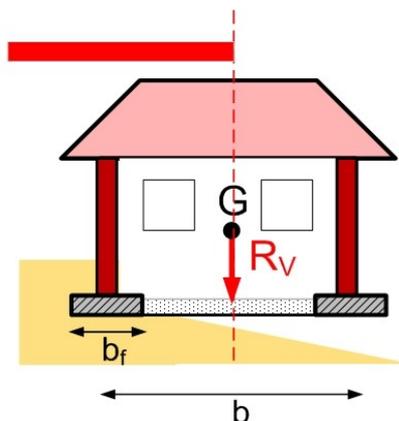
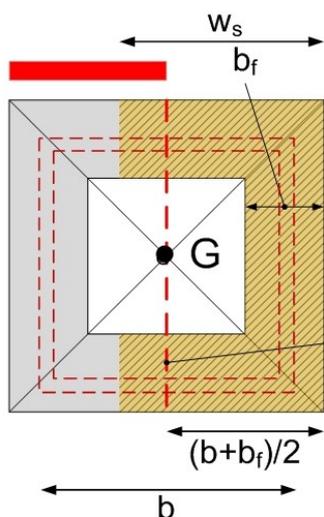


Figure 35 : Analyse graphique du positionnement du centre de poussée de la réaction du sol en fondation (cas n°3)

**CAS n°4**  $w_s > (b+b_f)/2$



La **stabilité est impossible** dès que la surface affouillée (jaune grisé) dépasse la position du centre de gravité du bâtiment (G). G est en dehors de la surface d'appui (en gris).

Au-delà de cette limite d'affouillement, l'équilibre physique n'est plus possible. Attention, il n'est pas garanti avant (voir cas n°1,2 et 3)

*Note : ces données géométriques sont compatibles avec les calculs utilisant des poids volumiques pour les murs*

INRAE I. Ousset/ J.-M. Tacnet

Figure 36 : Analyse graphique du positionnement du centre de poussée de la réaction du sol en fondation (cas n°4)

## 5. Méthodologie d'analyse de l'endommagement et de la fragilité

### 5.1. Définition de la charge supportée par la fondation d'une habitation

Trois types de bâti sont ici étudiés, tels que présentés à la Figure 37 : bâti avec fondation de type radier sous vide sanitaire, bâti avec fondation de type radier sous sous-sol ou bâti avec fondation de type semelle filante. Dans tous les cas, la toiture et les combles sont considérés respectivement à deux pans et non aménageables.

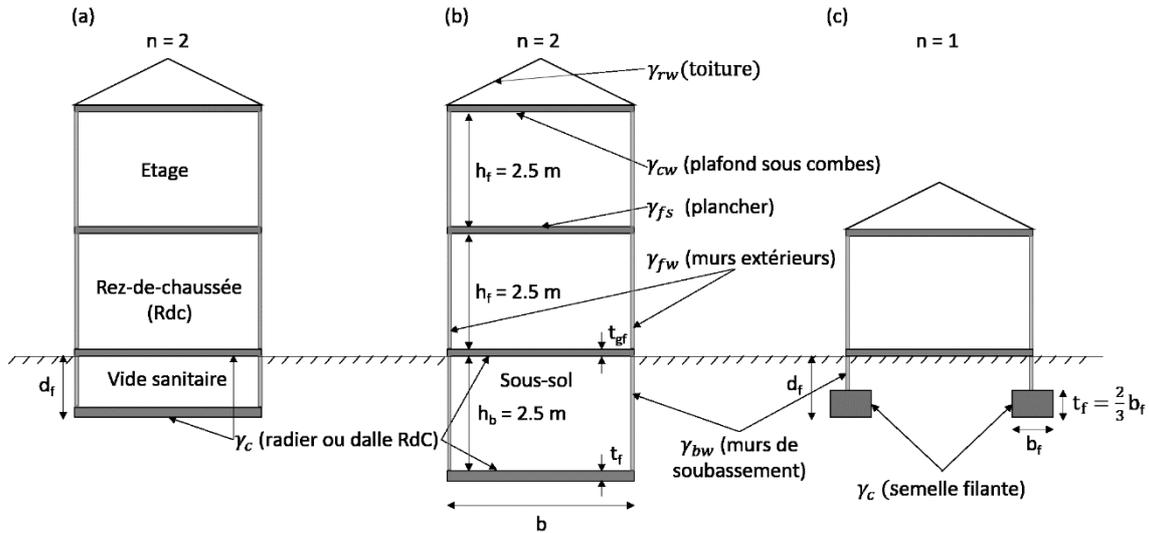


Figure 37 : Types de bâtis étudiés : (a) bâti avec fondation de type radier et vide sanitaire, (b) bâti avec fondation de type radier et sous-sol et (c) bâti avec fondation de type semelle filante, avec leurs dimensions ( $h$  : hauteur,  $b$  : largeur,  $t$  : épaisseur,  $d$  : profondeur) et leurs caractéristiques ( $\gamma_c$  : poids volumique du béton armé (dalles de fondation et du rez-de-chaussée),  $\gamma_{rw}$  : poids surfacique de la toiture,  $\gamma_{fw}$  : poids surfacique des murs extérieurs,  $\gamma_{bw}$  : poids surfacique des murs de soubassement et  $\gamma_{fs}$  : poids surfacique des planchers). Dans les cas a) et b) correspondant à une fondation de type radier, l'exemple d'une habitation avec un étage correspondant à un nombre  $n$  de niveaux habitables égal à 2 est ici fourni mais le cas  $n = 1$  est également traité; dans le cas c) correspondant à une fondation de type semelle filante, seul le cas d'une habitation de plain-pied ( $n = 1$ ) est par contre traité. A noter que la largeur  $b$  correspond à la dimension selon laquelle on analyse l'affouillement.

### 5.1.1. Calcul de la descente de charge (globale)

Dans les trois cas mentionnés à la Figure 37, la charge supportée par la fondation d'une habitation est composée d'actions réparties en deux catégories : les actions permanentes ( $G$ ) correspondant aux différents poids propres des éléments structuraux et non-structuraux composant la structure et les actions variables ( $Q$ ) correspondant dans notre cas aux charges d'exploitation (charges résultant de l'usage des locaux comprenant par exemple les poids des mobiliers fixes ou mobiles, des matériels entreposés et des personnes). Cette charge globale est calculée selon l'Équation 1:

$$R_v = \gamma_G (G_1 + G_2) + \gamma_Q Q$$

Équation 1 : Charge globale supportée par la fondation d'une habitation

- où
- $\gamma_G$  désigne le coefficient partiel pour les actions permanentes ;
  - $G_1$  désigne le poids propre des éléments structuraux ;
  - $G_2$  désigne les surcharges permanentes correspondant au poids propre des éléments non structuraux (toiture, cloisons, revêtements de sol, éléments techniques fixes tels que réseaux, équipements électriques ou de chauffage, chauffe-eau...);
  - $\gamma_Q$  désigne le coefficient partiel pour les actions variables ;
  - $Q$  désigne les charges d'exploitation.

Les actions correspondant aux différents poids propres sont calculées à partir des poids volumiques ou surfaciques des différents matériaux composant la structure tandis que les charges d'exploitation sont calculées à partir des charges d'exploitation surfaciques uniformément réparties fournies, selon la nature des locaux ou le type d'usage du bâtiment, par la réglementation en vigueur.

#### a. Calcul du poids propre de la structure porteuse (charge permanente)

Le poids propre de la structure porteuse (éléments structuraux) est calculé selon l'Équation 2 :

$$G_1 = G_{11} + G_{12} + G_{13}$$

*Équation 2 : Poids propre des éléments structuraux d'une habitation*

où  $G_{11}$  correspond au poids propre de la fondation en béton armé, calculé selon l'Équation 3 ou l'Équation 4 suivant que la fondation est de type radier ou de type semelle filante :

$$G_{11} = b * l * t_f * \gamma_c$$

*Équation 3 : Poids propre d'une fondation de type radier*

$$G_{11} = 2 * (b + l) * b_f * t_f * \gamma_c$$

*Équation 4 : Poids propre d'une fondation de type semelle filante*

avec  $b$  : largeur du bâti ;  
 $l$  : longueur du bâti ;  
 $t_f$  : épaisseur de la fondation de type radier ou de type semelle filante ;  
 $b_f$  : largeur de la fondation de type semelle filante ;  
 $\gamma_c$  : poids volumique du béton armé constituant la fondation.

$G_{12}$  correspond au poids propre des différents planchers et dalle (dalle du rez-de-chaussée, planchers inter-niveaux et plancher sous toiture) calculé selon l'Équation 5 :

$$G_{12} = b * l * (t_{gf} * \gamma_c + (n - 1) * \gamma_{fs} + \gamma_{cw})$$

*Équation 5 : Poids propre des planchers*

avec  $t_{gf}$  : épaisseur de la dalle en béton du rez-de-chaussée ;  
 $n$  : nombre de niveaux habitables (rez-de-chaussée + étages), non compris donc les sous-sol et combles (voir exemple à la Figure 37) ;  
 $\gamma_{fs}$  : poids surfacique des planchers inter-niveaux autres que le sous-sol et les combles ;  
 $\gamma_{cw}$  : poids surfacique du plancher des combles.

$G_{13}$  correspond au poids propre des murs porteurs (murs extérieurs et de soubassement), calculé selon l'Équation 6 ou l'Équation 7 suivant que la fondation est de type radier ou de type semelle filante. Il est composé du poids des murs de soubassement ( $2 * (b + l) * (d_f - t_f) * \gamma_{bw}$ ), du poids de l'ensemble des surfaces extérieures constituant le pourtour de l'habitation ( $2 * (b + l) * n * h_f * \gamma_{fw}$ ) auquel on doit déduire le poids correspondant à la surface totale des baies ( $n * \alpha_{bw} * b * l * \gamma_{fw}$ ) et du poids des parties de pignon sous toiture ( $\frac{\min(b;l)^2}{4} \tan \beta_r * \gamma_{fw}$ ) :

$$G_{13} = 2 * (b + l) * [n * h_f * \gamma_{fw} + (d_f - t_f) * \gamma_{bw}] + \left( \frac{\min(b;l)^2}{4} \tan \beta_r - n * \alpha_{bw} * b * l \right) * \gamma_{fw}$$

*Équation 6 : Poids propre des murs porteurs dans le cas d'une habitation avec vide sanitaire et une fondation de type radier ou avec une fondation de type semelle filante*

$$G_{13} = 2 * (b + l) * [n * h_f * \gamma_{fw} + h_b * \gamma_{bw}] + \left( \frac{\min(b;l)^2}{4} \tan \beta_r - n * \alpha_{bw} * b * l \right) * \gamma_{fw}$$

*Équation 7 : Poids propre des murs porteurs dans le cas d'une habitation avec sous-sol et une fondation de type radier*

avec  $h_f$  : hauteur de chaque niveau d'habitation ;  
 $h_b$  : hauteur du sous-sol ;  
 $\alpha_{bw}$  : ratio entre la surface totale des baies et la surface habitable ;  
 $d_f$  : profondeur de la fondation correspondant à la profondeur hors gel ;  
 $\gamma_{fw}$  : poids surfacique des murs extérieurs ;  
 $\gamma_{bw}$  : poids surfacique des murs de soubassement ;  
 $\beta_r$  : pente de la toiture.

### b. Calcul du poids propre des éléments non-structuraux (surcharge permanente)

Les charges permanentes sont également constituées des poids propres des éléments non-structuraux (toiture, cloisons, doublages, plafonds suspendus et éléments techniques tels que les installations de chauffage, d'eau, d'électricité, ...). Ces derniers sont calculés selon l'Équation 8 ou l'Équation 9 suivant la présence ou non d'un sous-sol :

$$G_2 = b * l * (\gamma_{rw} + n * g_k)$$

Équation 8 : Poids propre des éléments non-structuraux d'une habitation sans sous-sol

$$G_2 = b * l * (\gamma_{rw} + (n + 1) * g_k)$$

Équation 9 : Poids propre des éléments non-structuraux d'une habitation avec sous-sol

avec  $\gamma_{rw}$  : poids propre surfacique de la toiture ;  
 $g_k$  : poids surfacique des éléments non-structuraux autres que la toiture.

### c. Calcul de la charge variable

La charge variable est constituée dans notre cas uniquement des charges (ou surcharges) d'exploitation associées à l'occupation de la construction et modélisées dans le cas présent par des charges uniformément réparties.

Dans le cas d'un bâti avec au plus 2 niveaux comprenant le sous-sol, le calcul de la charge d'exploitation globale se fait selon l'Équation 10 ou l'Équation 11, suivant la présence ou non d'un sous-sol :

$$Q = b * l * (q_{k1} + n * q_{k2} + q_{k3})$$

Équation 10 : Charge d'exploitation globale dans le cas d'une habitation avec sous-sol avec  $(n+1)$  inférieur ou égal à 2

$$Q = b * l * (q_{k1} + n * q_{k2})$$

Équation 11 : Charge d'exploitation globale dans le cas d'une habitation sans sous-sol avec  $n$  inférieur ou égal à 2

avec  $q_{k1}$  : charge d'exploitation dans les combles en  $N/m^2$  ;  
 $q_{k2}$  : charge d'exploitation dans les espaces de vie en  $N/m^2$  ;  
 $q_{k3}$  : charge d'exploitation en sous-sol en  $N/m^2$ .

Au-delà de 2 niveaux comprenant le sous-sol, conformément à la clause 6.3.1.2 (11) de la norme NF P 06-111-2 (AFNOR 2004), un coefficient de réduction  $\alpha_n$ , qui sert à diminuer les charges d'exploitation pour tenir compte du fait que l'occupation des divers niveaux ne se fait pas toujours en même temps, peut s'appliquer à la charge d'exploitation totale apportée par les niveaux chargés au-dessus de la fondation, lorsque la charge d'exploitation est considérée comme action variable de base dans les combinaisons d'actions.

Dans le cas d'un bâti avec plus de 2 niveaux (i.e. pour un nombre de niveaux habitables  $n$  supérieur à 1 dans le cas d'un bâti avec sous-sol et supérieur à 2 dans le cas d'un bâti avec sous-sol), le calcul de la charge d'exploitation globale se fait donc selon l'Équation 12 ou l'Équation 13, suivant la présence ou non d'un sous-sol :

$$Q = \alpha_n * b * l * (q_{k1} + n * q_{k2} + q_{k3}) \quad \text{où} \quad \alpha_n = 0.5 + \frac{1.36}{n + 1}$$

Équation 12 : Charge d'exploitation globale dans le cas d'une habitation avec sous-sol avec  $(n+1)$  supérieur à 2

$$Q = \alpha_n * b * l * (q_{k1} + n * q_{k2}) \quad \text{où} \quad \alpha_n = 0.5 + \frac{1.36}{n}$$

Équation 13 : Charge d'exploitation globale dans le cas d'une habitation sans sous-sol avec  $n$  supérieur à 2

avec  $\alpha_n$  : coefficient de réduction des charges d'exploitation pour du bâti avec plus de 2 niveaux (comprenant le sous-sol).

## 5.1.2. Ordres de grandeur des variables intervenant dans le calcul des actions et valeurs des coefficients partiels

En première approche, nous avons considéré des cas de figure d'habitations ayant une emprise au sol allant de 50 à 170 m<sup>2</sup> correspondant à des longueurs ( $l$ ) et largeurs ( $b$ ) de bâti variant entre 7 et 13 m.

L'épaisseur d'un radier ( $t_f$ ) dépend du type de construction et de la nature du sol ; elle est généralement comprise entre 25 cm minimum et 40 cm. La largeur des semelles filantes ( $b_f$ ) est quant à elle généralement comprise entre 40 et 60 cm et la hauteur prise égale à 2/3 de la largeur (comme indiqué à la Figure 37). Ces fondations sont réalisées en béton armé, dont le poids volumique ( $\gamma_c$ ) est pris égal à la valeur caractéristique de 25 kN/m<sup>3</sup>.

La dalle du rez-de-chaussée est généralement d'épaisseur ( $t_{gf}$ ) comprise entre 12 et 15 cm et réalisée en béton armé.

Le DTU 13.1, qui concerne les fondations superficielles, précise les profondeurs des fondations hors gel minimales à respecter. Cette profondeur hors gel correspond à la distance qui sépare le niveau bas de la fondation de la surface du sol et est donnée par l'Équation 14.

$$d_f = d_{f0} + \frac{A - 150}{4000}$$

Équation 14 : Profondeur hors gel à respecter en fonction de l'altitude

où  $A$  est l'altitude où se trouve le bâti en m ;  
 $d_{f0}$  est la profondeur hors gel en m fournie à la Figure 38 pour des altitudes inférieures ou égales à 150 m.

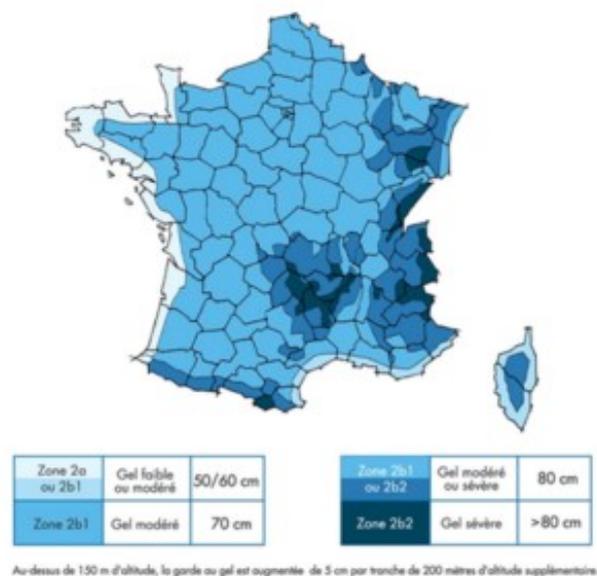


Figure 38 : Profondeur minimale hors gel, pour des altitudes inférieures à 150 m (Source : DTU 13.1)

Pour des habitations situées en zone de crues torrentielles, nous pouvons considérer que la profondeur hors gel peut varier entre 1 et 1.2 m.

Les poids surfaciques des murs porteurs ( $\gamma_{fw}$  pour les murs extérieurs et  $\gamma_{bw}$  pour les murs de soubassement) pris en compte dans cette étude font référence aux poids surfaciques fournis dans le Grand Guide de la Maçonnerie publié aux éditions Bilp (Caillard 2017) et dans l'article intitulé « La masse volumique et la masse surfacique des murs » publié le 12 février 2014 sur le site : <http://www.leplancherpoutrelleshourdispourlesnuls.com/category/materiaux-de-construction/> et repris dans le Tableau 2.

Type de matériau	Dimensions	Poids surfacique en kN/m <sup>2</sup>
Parpaings avec enduit	Parpaings creux 20x20x50	3.1
	Parpaings creux 15x20x50	2.3
	Parpaings pleins 20x20x50	4.3
	Parpaings pleins 15x20x50	3.4
Briques creuses	20x20x50	2.5
	20x25x50	2.8
	20x30x50	3.3
Pierre de taille	épaisseur 25 cm	6.7
	épaisseur 37.5 cm	9.4
Moellons	épaisseur 37.5 cm	9
	épaisseur 40 cm	9.7
Béton cellulaire	épaisseur 25 cm	2.6
	épaisseur 37.5 cm	3.9
	épaisseur 40 cm	4.2

Tableau 2 : Poids surfaciques des matériaux les plus courants constitutifs des murs porteurs des habitations (Sources : Grand Guide de la Maçonnerie publié aux éditions Bilp, 2017 (Caillard 2017) et <http://www.leplancherpoutrelleshourdispourlesnuls.com>)

La surface totale des baies est prise égale à 1/6 (17%) de la surface habitable, minimum imposé par la réglementation environnementale RE2020, et la pente de la toiture est considérée comme variant entre 15 et 30 % (soit entre 8.53 et 16.7°).

Les ordres de grandeur retenus des poids surfaciques des planchers ( $\gamma_{fs}$ ) et du plafond sous les combles sont quant à eux présentés dans le Tableau 3 et le poids surfacique du plafond sous les combles ( $\gamma_{cw}$ ) est pris égal à 1.5 kN/m<sup>2</sup>.

Type de plancher	Caractéristique	Poids surfacique en kN/m <sup>2</sup>
Plancher poutrelle hourdis	Hourdis béton	2.6 à 4 (suivant les hauteurs du hourdis et de la dalle de compression)
	Hourdis polystyrène	1.8 à 2.8 (suivant les hauteurs du hourdis et de la dalle de compression)

Tableau 3 : Poids surfaciques des planchers inter-niveaux autres que les combles (Source : <http://www.leplancherpoutrelleshourdispourlesnuls.com>)

Pour le calcul de la charge permanente liée aux éléments non-structuraux, un poids surfacique ( $g_k$ ) oscillant entre 1 et 2 kN/m<sup>2</sup> de plancher et pour les combles un poids surfacique ( $\gamma_{rw}$ ) compris entre 0.3 et 1.2 kN/m<sup>2</sup> de plancher correspondant au poids de la toiture ont été pris en compte.

Les charges d'exploitation ( $q_k$ ) sont issues des valeurs fixées par la réglementation, et plus précisément la norme NF EN 1991-1-1 et son annexe NF P 06-111-2 prises en application de l'Eurocode 1 (AFNOR 2004). Trois charges d'exploitation, récapitulées au Tableau 4, sont distinguées dans notre étude :

- celle relative aux combles ( $q_{k1}$ ), pouvant prendre des valeurs de 0, 1.5 ou 2.5 kN/m<sup>2</sup> suivant le type de combles : comble perdu, comble aménageable ou grenier ; dans notre étude, seul le cas de combles non aménageables est considéré, avec donc  $q_{k1} = 0$  kN/m<sup>2</sup> ;
- celle relative aux espaces de vie autres que les combles ( $q_{k2}$ ), prise égale à la valeur fixée par la réglementation, à savoir 1.5 kN/m<sup>2</sup> ;
- celle relative au sous-sol ( $q_{k3}$ ), comprise entre 1.5 et 2.5 kN/m<sup>2</sup>.

Type d'usage	Charge d'exploitation en kN/m <sup>2</sup>
Espaces de vie, y compris combles aménageables	1.5
Garages, greniers	1.5 à 2.5
Combles non aménageables	0 à 1

Tableau 4 : Valeurs des charges d'exploitation des habitations en fonction du type d'usage (Source : norme NF EN 1991-1-1 et son annexe NF P 06-111-2 (AFNOR 2004))

Les valeurs des paramètres de dimensionnement et les caractéristiques des matériaux constituant le bâti retenues dans la présente étude sont récapitulées au Tableau 5.

Dénomination	Symbole	Valeur minimale	Valeur maximale	Unité	
Largeur du bâti	$b$	7	13	m	
Longueur du bâti	$l$	7	13	m	
Nombre de niveaux habitables du bâti (rez-de-chaussée + étages, non compris sous-sol et combles)	$n$	1	2	-	
Hauteur des niveaux habitables et du sous-sol	$h_f, h_b$	2.5		m	
Epaisseur de la dalle de fondation	$t_f$	0.25	0.3	m	
Largeur de la semelle de fondation	$b_f$	0.4	0.6	m	
Epaisseur de la semelle de fondation	$t_f$	$t_f = \frac{2}{3} b_f$		m	
Epaisseur de la dalle du rez-de-chaussée	$t_{gf}$	0.1	0.15	m	
Profondeur hors gel	$d_f$	1	1.2	m	
Poids volumique de la fondation (béton armé)	$\gamma_c$	25		kN/m <sup>3</sup>	
Poids surfacique des planchers inter-niveaux autres que le sous-sol et les combles	$\gamma_{fs}$	1.8	3	kN/m <sup>2</sup>	
Poids surfacique du plafond sous les combles	$\gamma_{cw}$	1.5		kN/m <sup>2</sup>	
Poids surfacique des murs porteurs extérieurs	Parpaings creux	$\gamma_{fw}$	2.3	3.1	kN/m <sup>2</sup>
	Briques creuses		2.5	3.3	
	Pierres		6.7	9.4	
	Moellons		9	9.7	
	Béton cellulaire		2.6	4.2	
Poids surfacique des murs porteurs de soubassement	Parpaings pleins	$\gamma_{bw}$	3.4	4.3	kN/m <sup>2</sup>
Ratio entre surface des baies et surface habitable	$\alpha_{bw}$	1/6		-	
Pente de la toiture	$\beta_r$	15	30	%	
		8.53	16.7	°	
Poids surfacique de la toiture	$\gamma_{rw}$	0.3	1.2	kN/m <sup>2</sup>	
Poids surfacique des éléments non-structuraux autres que la toiture	$g_k$	0.5	1	kN/m <sup>2</sup>	
Charge d'exploitation dans les combles non aménagés	$q_{k1}$	0		kN/m <sup>2</sup>	
Charge d'exploitation dans les espaces de vie	$q_{k2}$	1.5		kN/m <sup>2</sup>	
Charge d'exploitation en sous-sol	$q_{k3}$	1.5	2.5	kN/m <sup>2</sup>	

Tableau 5 : Ordres de grandeur des paramètres de dimensionnement du bâti et des caractéristiques des matériaux le constituant

La valeur des coefficients partiels est fournie dans le Tableau 6 et dépend du type d'action (permanente ou variable), de la situation de projet (durable, transitoire ou accidentelle) et de l'état limite étudié.

Pour rappel, les états limites sont les phénomènes que l'on souhaite éviter. Ils correspondent à des états au-delà desquels l'ouvrage ne satisfait plus aux critères de dimensionnement. On distingue deux catégories d'états limites :

- les états limites de service (ELS), correspondant à des conditions au-delà desquelles les exigences d'aptitude au service de l'ouvrage ne sont plus satisfaites : les ELS sont les états limites associés au fonctionnement de la structure ou des éléments structuraux en utilisation normale d'exploitation ;
- les états limites ultimes (ELU), associés à des pertes d'équilibres statiques ou des modes de ruine ; ils correspondent aux états limites qui concernent la sécurité des personnes et/ou la sécurité de la structure (Royet & Peyras 2010).

Type action	Coefficient partiel	ELS	ELU durable ou transitoire	ELU accidentel
Permanente	$\gamma_G$	1	1.35	1
Variable	$\gamma_Q$	1	1.5	1

Tableau 6 : Coefficients partiels relatifs aux combinaisons d'actions

Dans notre étude portant sur le risque torrentiel, seuls les états limites ultimes sont étudiés pour des situations transitoire et accidentelle (ELU transitoire et ELU accidentel).

## 5.2. Etude de la stabilité externe d'une fondation de type radier ou semelle filante

Dans cette étude, la stabilité externe de la fondation est étudiée en considérant que la fondation est affouillée sur toute sa longueur  $l$  ( $L_s = l$ ) parallèle au cours d'eau et sur une largeur  $w_s$  perpendiculaire au cours d'eau (Figure 39).

### 5.2.1. Calcul de l'excentricité

*Hypothèses d'affouillement mono-directionnel*

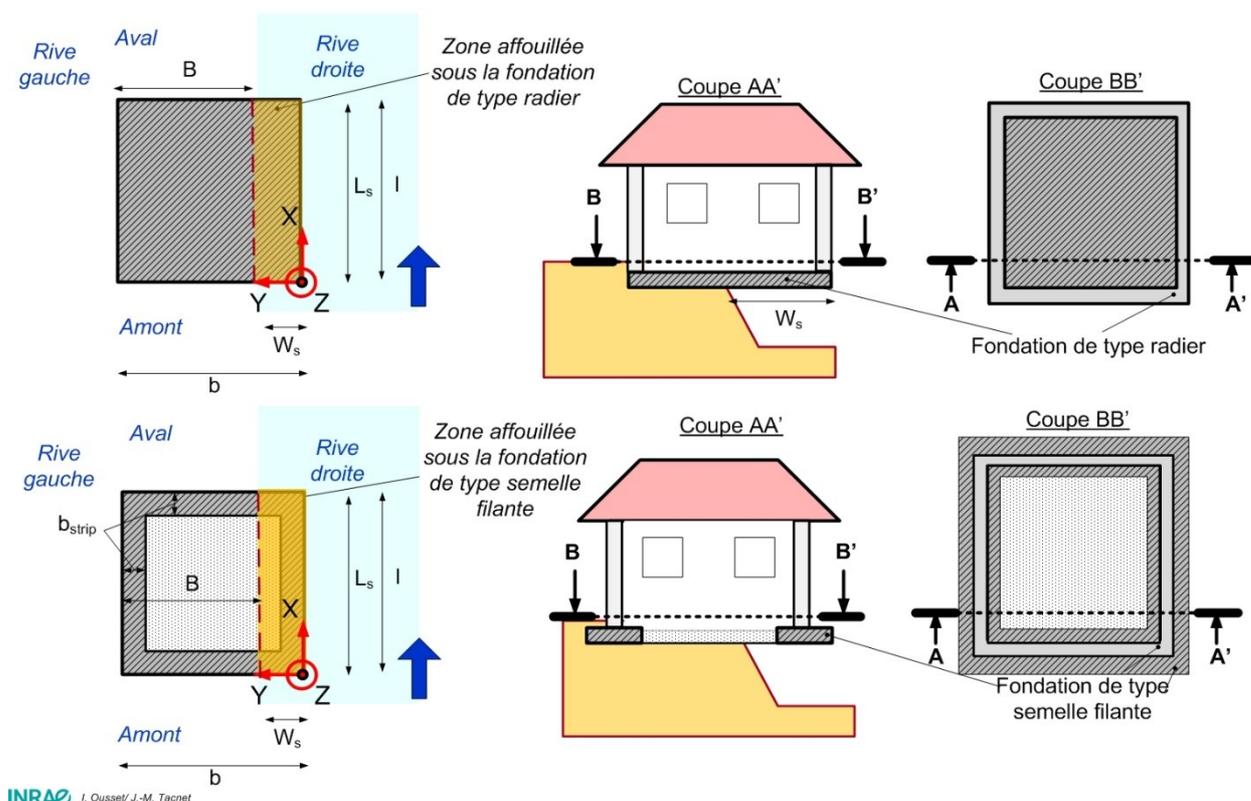


Figure 39 : Caractéristiques d'affouillement pour les deux cas de fondations étudiés (radier et semelle filante)

La largeur  $B$  de fondation non affouillée (Figure 40) est fournie par l'Équation 15 dans le cas d'une fondation de type radier et par l'Équation 16 dans le cas d'une fondation de type semelle filante.

$$B = b - w_s$$

Équation 15 : Largeur de fondation non affouillée ( $B$ ) pour une fondation de type radier

$$B = b + b_f - w_s$$

Équation 16 : Largeur de fondation non affouillée ( $B$ ) pour une fondation de type semelle filante

La distance  $X$  (Figure 40) entre la fin de la zone affouillée et le centre de gravité de la fondation (au niveau duquel s'applique la résultante des actions auxquelles il est soumis) est alors calculée selon l'Équation 17 dans le cas d'une fondation de type radier et l'Équation 18 dans le cas d'une fondation de type semelle filante.

$$X = \frac{b}{2} - w_s$$

Équation 17 : Distance  $X$  entre la fin de la zone affouillée et le centre de gravité d'une fondation de type radier

$$X = \frac{b + b_f}{2} - w_s$$

Équation 18 : Distance  $X$  entre la fin de la zone affouillée et le centre de gravité d'une fondation de type semelle filante

L'excentricité  $e$  de la charge  $R_v$ , c'est à dire la distance entre le point d'application de cette charge et le centre de la semelle non affouillée (tel que représenté à la Figure 40), est alors fournie par l'Équation 19, quel que soit le type de fondation (radier ou semelle filante).

$$e = X - \frac{B}{2}$$

Équation 19 : Excentricité de la charge appliquée sur une fondation affouillée

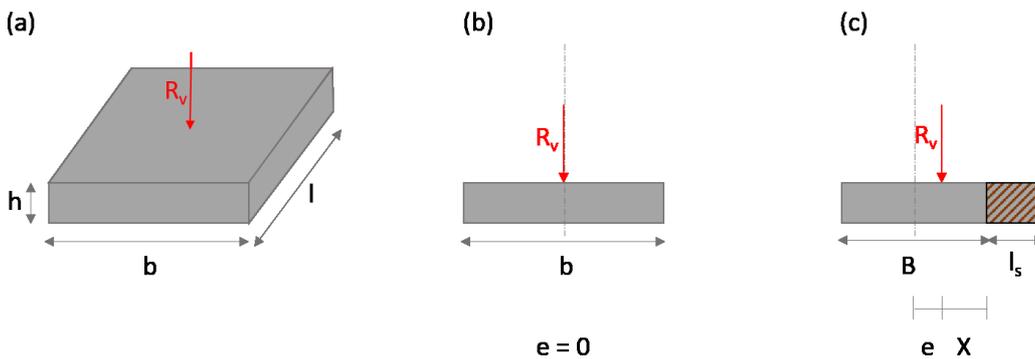


Figure 40 : Radier de fondation : (a) Dimensions, (b) Radier avant affouillement et (c) Radier après affouillement

## 5.2.2. Calcul de la contrainte de référence et de la surface d'un radier comprimé

La justification de la fondation vis-à-vis de l'état limite ultime de mobilisation du sol de fondation est menée à partir d'une contrainte conventionnelle de référence notée  $q'_{ref}$  et de la surface de radier comprimé  $A_{eff}$ . Cette contrainte de référence, appliquée par la fondation au sol, prend en compte le fait que la charge appliquée sur la fondation peut être excentrée (du fait, dans le cas présent, d'un affouillement). Cette contrainte, à comparer *in fine* à la contrainte de rupture du sol, est calculée dans le cadre de notre étude à l'aide de la méthode d'interaction sol-structure de Meyerhof qui considère une répartition uniforme de la contrainte appliquée au sol sur une semelle comprimée réduite, de largeur  $B - 2|e|$  (Figure 41).

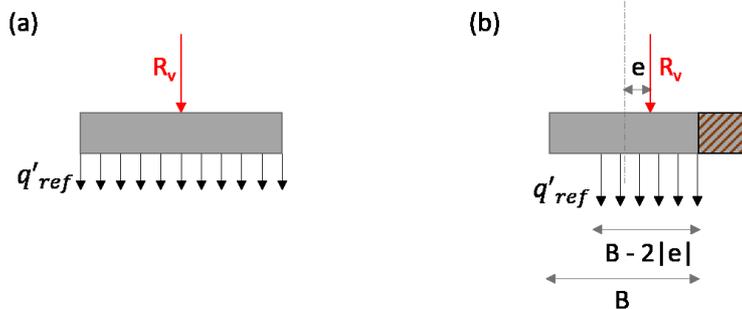


Figure 41 : Diagramme des contraintes appliquées sous le radier : (a) sans affouillement, (b) avec affouillement

Les valeurs de la surface de radier comprimé  $A_{eff}$  et de la contrainte de référence  $q'_{ref}$ , telle que représentée à la Figure

41, sont définies respectivement aux Équation 20 et Équation 21 :

$$A_{eff} = (B - 2|e|) * l$$

Équation 20 : Formule de calcul de la surface de radier comprimé  $A_{eff}$  équivalente, selon la méthode de Meyerhof

$$q'_{ref} = \frac{R_v}{A_{eff}} = \frac{R_v}{(B - 2|e|) * l}$$

Équation 21 : Formule de calcul de la contrainte conventionnelle de référence  $q_{ref}$  pour une fondation de type radier

### 5.2.3. Calcul de la contrainte de référence et de la surface comprimée d'une semelle filante

Les différents cas possibles de surface comprimée dans le cas d'une fondation de type semelle filante sont présentées, selon la largeur d'affouillement, aux Figure 42 (pour  $w_s < b_f$ ), Figure 43 (pour  $w_s = b_f$ ), Figure 44 (pour  $b_f < w_s < (b+b_f)/2$ ) et Figure 45 (pour  $w_s > (b+b_f)/2$ ).

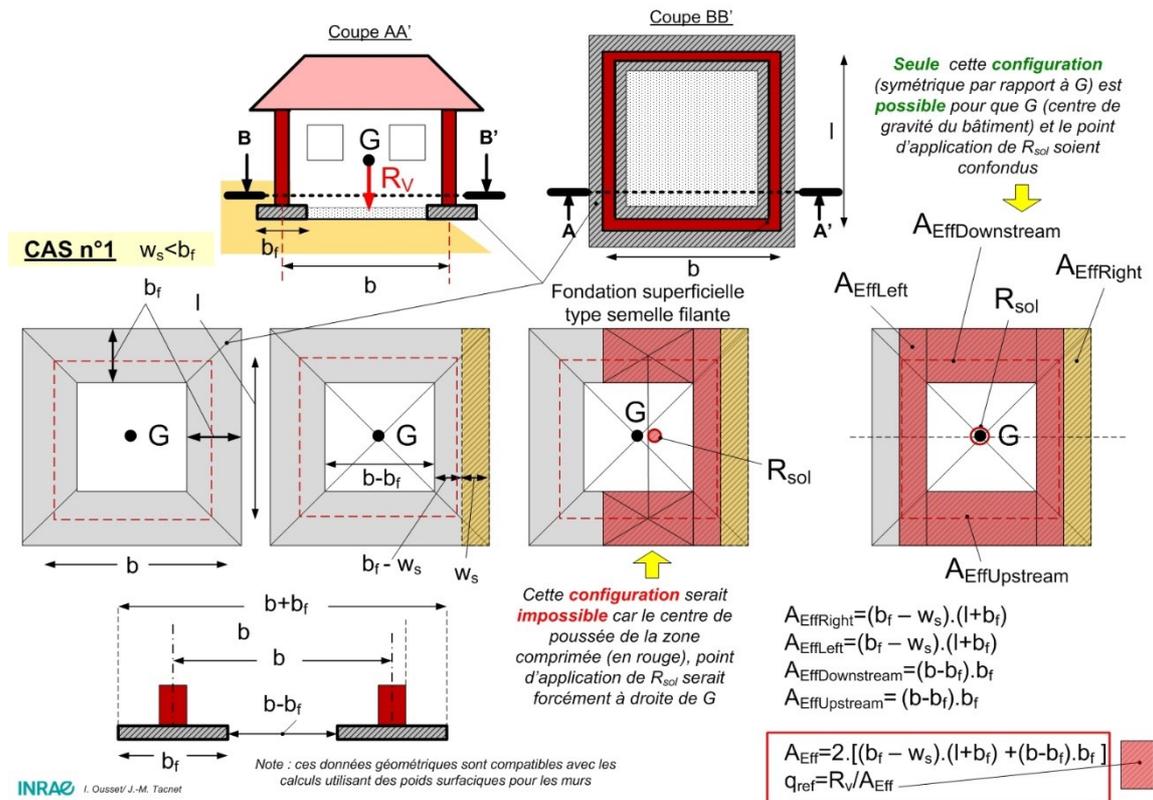


Figure 42 : Cas1 - Configuration de la surface comprimée  $A_{eff}$  (en rouge grisé) pour une fondation de type semelle filante dans le cas d'une largeur d'affouillement  $w_s$  (zone affouillée en jaune grisé) inférieure à la largeur  $b_s$  de la semelle

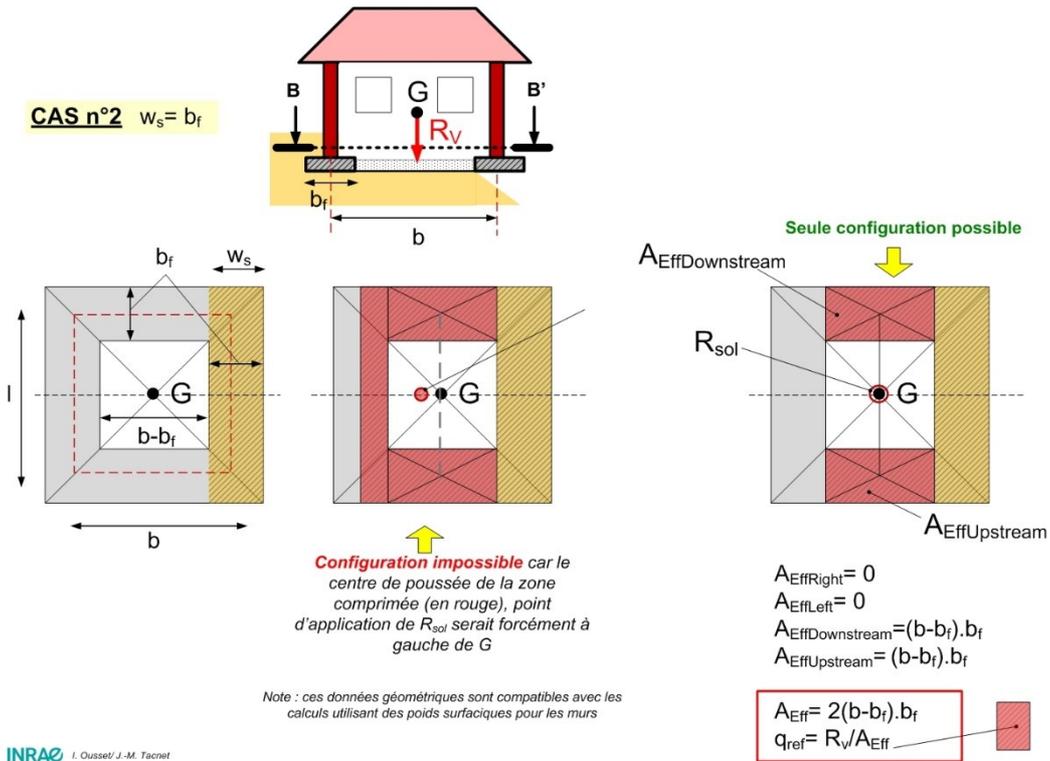


Figure 43 : Cas 2 - Configuration de la surface comprimée  $A_{eff}$  (en rouge grisé) pour une fondation de type semelle filante dans le cas d'une largeur d'affouillage  $w_s$  (zone affouillée en jaune grisé) égale à la largeur  $b_s$  de la semelle

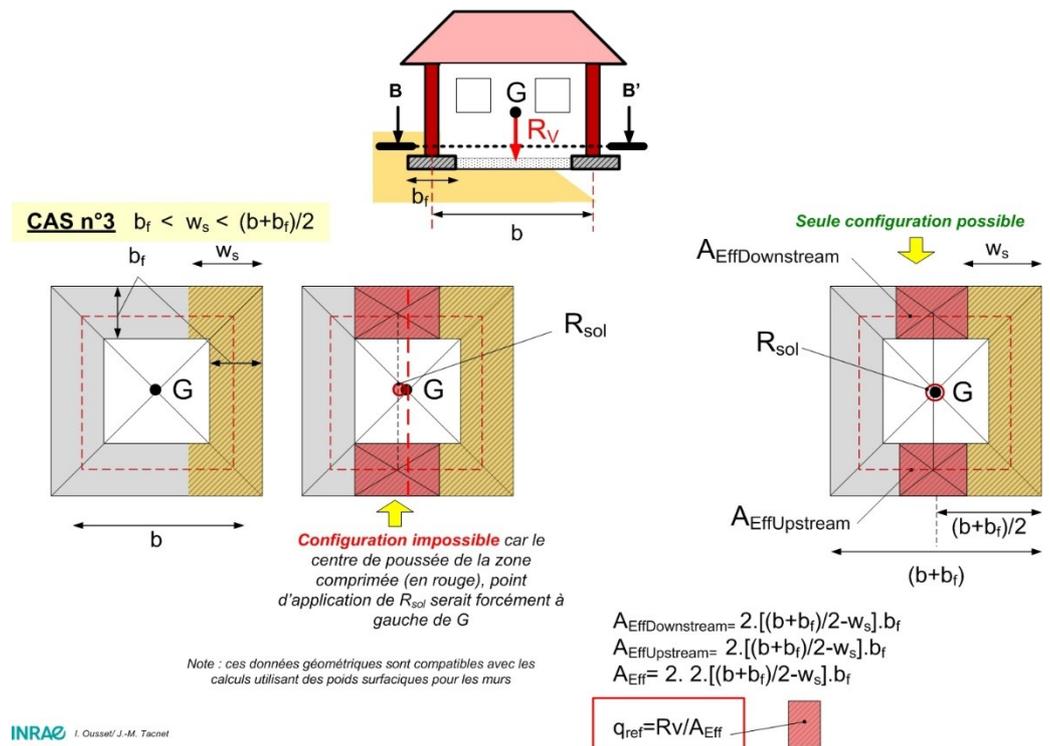


Figure 44 : Cas 3 - Configuration de la surface comprimée  $A_{eff}$  (en rouge grisé) pour une fondation de type semelle filante dans le cas d'une largeur d'affouillage  $w_s$  (zone affouillée en jaune) comprise entre la largeur  $b_s$  et la moitié de la longueur  $b + b_s$  de la semelle

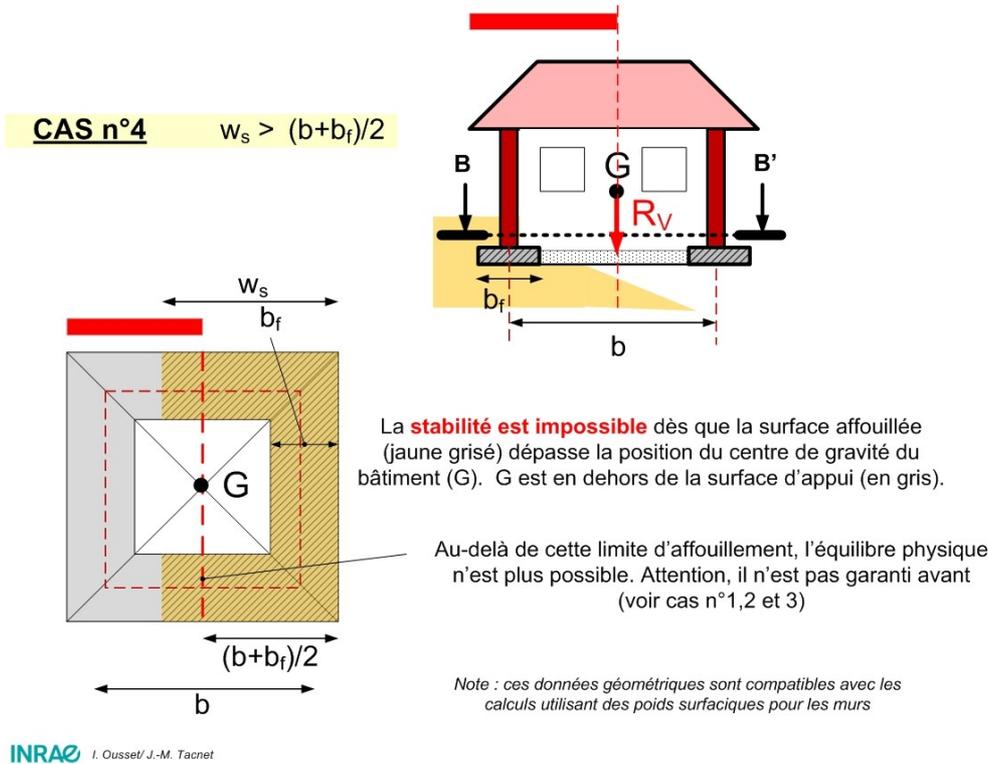


Figure 45 : Cas 4 - Configuration d'une fondation de type semelle filante affouillée sur une largeur  $w_s$  (zone affouillée en jaune grisé) supérieure à la moitié de la longueur  $b + b_s$  de la semelle

In fine, la surface de semelle comprimée  $A_{eff}$  selon la méthode de Meyerhof pour une fondation de type semelle filante est calculée selon l'Équation 22.

$$A_{eff} = 2 * [(b_f - w_s) * (l + b_f) + (b - b_f) * b_f] \quad \text{pour } w_s \leq b_f \quad (\text{voir cas1, Figure 42})$$

$$A_{eff} = 2 * (b + b_f - 2 * w_s) * b_f \quad \text{pour } b_f < w_s < \frac{b+b_f}{2} \quad (\text{voir cas 3, Figure 44})$$

Équation 22 : Formules de calcul de la surface de semelle comprimée  $A_{eff}$  équivalente, selon la méthode de Meyerhof

La surface de semelle non affouillée  $A_{ns}$  est quant à elle déterminée selon l'Équation 23.

$$A_{ns} = (2 * b_f - w_s) * (l + b_f) + 2 * (b - b_f) * b_f \quad \text{pour } w_s \leq b_f$$

$$A_{ns} = [l + b_f + 2 * (b - w_s)] * b_f \quad \text{pour } b_f < w_s < \frac{b + b_f}{2}$$

Équation 23 : Formules de calcul de la surface de la semelle non affouillée  $A_{ns}$

La contrainte de référence  $q'_{ref}$  est calculée de la même façon que pour la fondation de type radier, selon l'Équation 24.

$$q'_{ref} = \frac{R_v}{A_{eff}}$$

Équation 24 : Formule de calcul de la contrainte conventionnelle de référence  $q_{ref}$

## 5.2.4. Calcul de la contrainte admissible du sol

La contrainte admissible du sol pour la reprise des charges transmises par la fondation dépend de la nature du sol, de l'angle de la résultante des forces qui s'y appliquent et de la présence d'une pente à proximité. Elle est calculée dans la présente étude selon la formule fournie par le Fascicule 62 Titre V (METL 1993) :

$$\sigma_{adm} = \frac{1}{\gamma_q} (q'_u - q'_0) i_\delta i_\beta + q'_0$$

- avec  $q'_u$  : contrainte de rupture du sol sous charge verticale centrée ;  
 $q'_0$  : contrainte verticale du sol effective que l'on obtiendrait dans le sol en faisant abstraction de la fondation, généralement considérée comme nulle ;  
 $i_\delta$  : coefficient minorateur tenant compte de l'inclinaison de la charge (= 1 pour une charge verticale) ;  
 $i_\beta$  : coefficient minorateur lié la proximité d'une pente du sol de fondation ;  
 $\gamma_q$  : coefficient de sécurité partiel pris égal à 2 pour la justification des ELU (et à 3 pour les ELS).

On évalue  $q'_u$  selon :

$$q'_u = q'_0 + k_p p_{ie}^*$$

- avec  $k_p$  : facteur de portance du sol pouvant être prudemment évalué à l'unité ;  
 $p_{ie}^*$  : pression limite nette équivalente mesurée au pressiomètre.

La contrainte admissible du sol peut donc en définitive être calculée selon l'Équation 25.

$$\sigma_{adm} = \frac{1}{\gamma_q} p_{ie}^* i_\beta$$

*Équation 25 : Contrainte maximale admissible par un sol*

Les valeurs courantes de  $p_{ie}^*$  pour différents types de sols sont fournies aux Tableau 7 et Tableau 8.

Soil Classification	$p_{L m}$ (kN/m <sup>2</sup> )
Clay	0 – 1200
Silt	0 – 700
Firm Clay or Marl	1800 – 4000
Compressible Sand	400 – 800
Compacted Silt	1200 – 3000
Soft on Weathered Rock	1000 – 3000
Sand and Gravel	1000 – 2000
Rock	4000 – 10000
Very Compacted Sand and Gravel	3000 – 6000

*Tableau 7 : Gamme de pression limite pour différents types de sols (Gupta & Sundaram 2003)*

Nature des terrains		$p_{le}^*$ (MPa)
Argiles et limons	Très mous à mous	< 0.4
	Fermes	0.4 à 1.2
	Raides	1.2 à 2
	Très raides	$\geq 2$
Sables et graves	Très lâches	< 0.2
	Lâches	0.2 à 0.5
	Moyennement denses	0.5 à 1
	Denses	1 à 2
	Très denses	> 2
Craies	Molles	< 0.7
	Altérées	0.7 à 3
	Saines	$\geq 3$
Marne et calcaire marneux	Tendres	< 1
	Raides	1 à 4
	Très raides	> 4
Rocher	Altéré	2.5 à 4
	Fragmenté	> 4

Tableau 8 : Classement des sols en fonction de la pression limite, selon la norme NF P 94-261, Tab. A.2.1 (AFNOR 2004)

La proximité d'un talus va induire une réduction de la contrainte admissible en fondation. La Figure 46 fournit des valeurs de  $i_\beta$  en fonction de  $d/B$  où  $d$  désigne la distance horizontale entre le talus et la base de la fondation superficielle et  $B$  la largeur de la fondation, pour une hauteur d'encastrement équivalente  $D_e$  de la fondation dans le terrain égale à 1 mètre, une pente de talus situé à proximité de la fondation superficielle  $\beta$  égale  $33,7^\circ$  et un angle de frottement interne du sol égal à  $30^\circ$ . La configuration d'affouillement correspondant à un rapport  $d/B$  égal à 0, on considèrera par la suite que le coefficient de réduction de la capacité portante  $i_\beta$  d'un sol torrentiel varie entre 0.3 et 0.55 (pour des sols frottant).

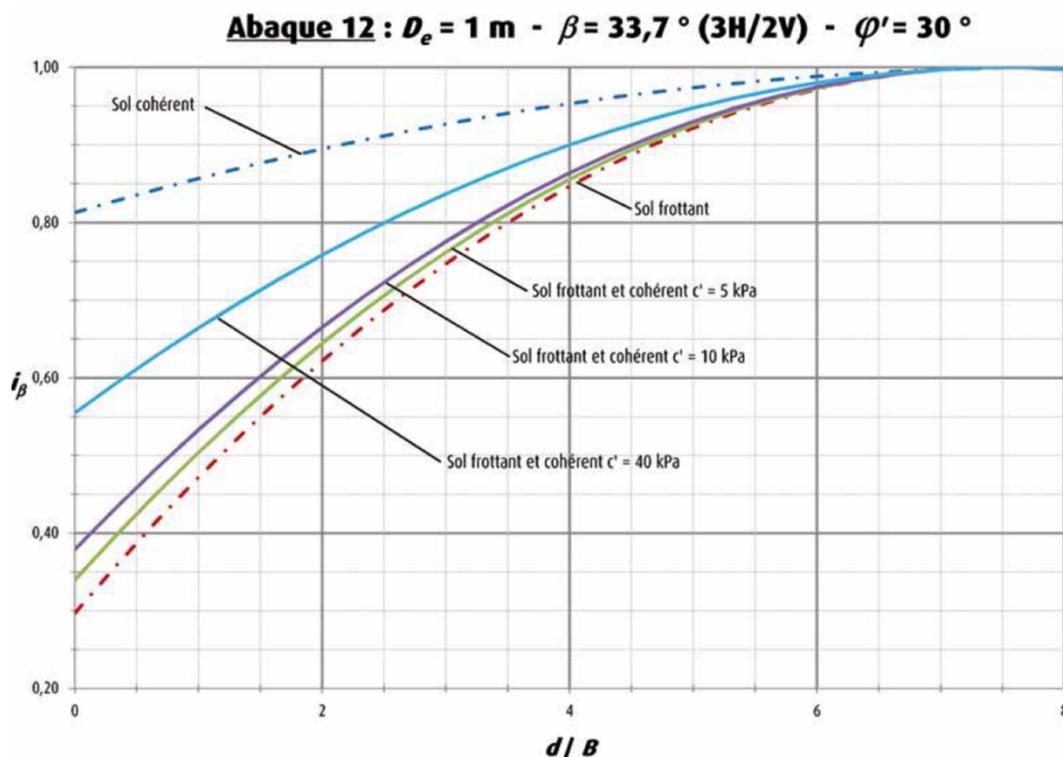


Figure 46 : Abaque permettant de déterminer le coefficient réducteur de la portance  $i_\beta$  lié à la proximité d'un talus (Source : (Cerema 2014))

Les caractéristiques de sol finalement retenues sont résumées au Tableau 9.

Dénomination	Symbole	Distribution	Valeurs	Unité
Pression limite du sol	$p_{le}^*$	Fixe ou Uniforme	1 000 à 3 000	kPa
Coefficient minorateur lié à la proximité d'une pente	$i_\beta$	Fixe ou Uniforme	0.3 (hypothèse défavorable ; cohésion du sol nulle) à 0.55 (cohésion du sol égale à 40 kPa)	-

Tableau 9 : Valeurs et caractéristiques retenues pour les paramètres relatifs à la résistance du sol

## 5.2.5. Conditions de stabilité de la structure

Dans la présente étude, étant donné que l'on traite des problèmes d'affouillement torrentiel survenant essentiellement en période de crue, seuls les états ultimes (transitoire et accidentel) sont traités, comme indiqué plus haut. Pour ces ELU, la stabilité de la fondation est étudiée vis-à-vis d'une part du renversement et d'autre part de la portance du sol.

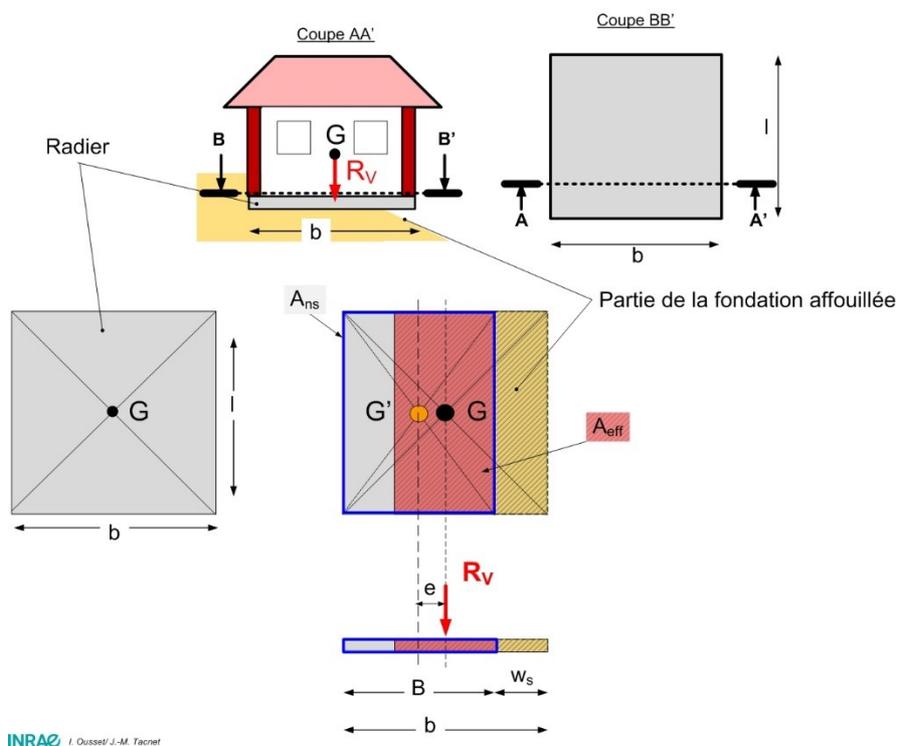


Figure 47 : Parties affouillées, non affouillées et comprimées d'une fondation de type radier

La fondation est considérée comme stable vis-à-vis de la mobilisation du sol si la surface de sol comprimée réelle est au moins égale à 10 % de la surface totale de la fondation non affouillée (Figure 47). Au-delà, la structure renverse. Dans le cas du modèle de Meyerhof, le champ de contrainte appliqué par la fondation sur le sol est considéré comme rectangulaire alors que, dans la réalité, il est en fait triangulaire dès lors qu'une partie du sol de fondation n'est plus mobilisée (cas du modèle d'interaction sol-structure de Navier). La surface effective calculée dans le modèle de Meyerhof est donc inférieure à la surface réelle comprimée ; la surface de sol comprimée réelle doit en fait être prise égale à  $3/2 * A_{eff}$  du modèle de Meyerhof, ce coefficient de  $3/2$  correspondant à l'équivalence entre un champ de contrainte triangulaire (modèle de Navier) et un champ de contrainte rectangulaire équivalent (modèle de Meyerhof).

La condition de stabilité à l'ELU de renversement s'écrit donc :  $\frac{3}{2} A_{eff} \geq \frac{1}{10} * A_{ns}$ , où  $A_{eff}$  désigne la surface effective

équivalente du modèle de Meyerhof et  $A_{ns}$  la surface de fondation non affouillée, ce qui conduit à une condition de stabilité au renversement générale (que la fondation soit de type radier ou de type semelle filante) décrite par l'Équation 26.

$$A_{eff} \geq \frac{1}{15} A_{ns}$$

Équation 26 : Condition de stabilité au renversement d'une fondation de type radier ou semelle filante selon le modèle de Meyerhof

Dans le cas d'une fondation de type radier,  $A_{eff} = (B - 2 * |e|) * l$  et  $A_{ns} = B * l$ . La condition de stabilité au renversement peut alors être décrite par l'Équation 27, qui montre que le renversement intervient dans ce cas pour un ratio d'affouillement constant égal à 48.2 %.

$$1 - 2 \frac{|e|}{B} \geq \frac{1}{15} \text{ soit } \frac{w_s}{b} \leq \frac{14}{29} \sim 0.482$$

Équation 27 : Condition de stabilité au renversement d'une fondation de type radier

L'ELU de mobilisation de la capacité portante du sol consiste quant à lui à vérifier que la contrainte de référence, correspondant à la contrainte normale appliquée par la fondation sur le sol, est inférieure ou égale à la contrainte maximale admissible par le sol. Cet ELU est décrit par l'Équation 28.

$$q'_{ref} \leq \sigma_{adm}$$

Équation 28 : Condition de stabilité de la structure au regard de la portance du sol

## 5.3. Etude de vulnérabilité

L'objectif de l'étude dite de « vulnérabilité » est de développer des courbes d'endommagement et des courbes de fragilité du bâti décrivant l'endommagement ou la probabilité de défaillance de la structure en fonction de l'intensité de l'aléa, en vue de leur utilisation ultérieure dans les études d'aide à la décision ou dans le calcul de risque. Cette étude est menée ici vis-à-vis des risques de renversement du bâti et de défaut de portance du sol fonctions du degré d'affouillement.

### 5.3.1. Etablissement de courbes d'endommagement

Les courbes d'endommagement relient un taux d'endommagement avec une valeur d'intensité de l'aléa. L'aléa est ici décrit comme étant le taux d'affouillement  $\frac{w_s}{b}$  correspondant à la proportion de largeur du bâti affouillé perpendiculairement au cours d'eau, ce bâti étant par ailleurs considéré comme affouillé sur toute sa longueur (*ie* dans la direction parallèle au cours d'eau). Le taux d'endommagement correspond quant à lui au maximum des rapports d'une part entre la contrainte exercée par la fondation sur le sol et la contrainte admissible du sol (endommagement vis-à-vis de la portance du sol) et d'autre part entre la surface réelle comprimée et 10 % de la surface non affouillée (endommagement vis-à-vis du renversement), jusqu'à ce que ce rapport soit égal à 1 ; le taux d'endommagement est ensuite décrit comme constant et égal à 1, la structure étant ce cas considérée comme totalement endommagée.

#### a. Fonctions de performance

Ce taux d'endommagement est donc décrit par deux fonctions de performance inférieures ou égales à 1 tant que la structure est stable et supérieures à 1 dès lors que la structure devient instable. Il faut ici bien noter que la performance est une notion relative qui dépend du seuil retenu pour qualifier la rupture (taux d'endommagement égal à 1).

### a.1. Renversement

Etant donnée la condition de stabilité définie précédemment (Équation 26), la fonction de performance vis-à-vis du renversement peut être décrite selon l'Équation 29.

$$G_R = \frac{A_{ns}}{15 * A_{eff}}$$

Équation 29 : Fonction de performance correspond à l'ELU renversement pour une fondation de type radier ( $B^*l$ ) ou semelle filante ( $A_{ns}$ )

### a.2. Portance du sol

La fonction de performance permettant de décrire la performance de la structure vis-à-vis de la portance du sol est celle décrite selon l'Équation 30.

$$G_S = \frac{q'_{ref}}{\sigma_{adm}}$$

Équation 30 : Fonction de performance correspond à l'ELU portance du sol

### a.3. Fonction de performance globale

La fonction de performance finale  $G$  est une combinaison des deux critères précédents telle que décrite par l'Équation 31.

$$G = \max(G_R, G_S)$$

Équation 31 : Fonction de performance globale

## b. Méthode d'élaboration

Les courbes d'endommagement proposées ici décrivent l'évolution de la fonction de performance globale en fonction de l'intensité d'aléa correspondant au taux de largeur affouillée  $\frac{w_s}{b}$ . Elles sont établies pour des valeurs fixes des paramètres liés au bâti (dimensions, poids) et des caractéristiques du sol ( $p_{ie}^*$ ,  $i_\beta$ ) correspondant respectivement aux jeux de valeurs conduisant aux courbes enveloppes minimales et maximales. Selon l'étude paramétrique réalisée et décrite plus loin, pour le bâti avec radier, la courbe minimale est obtenue en combinant les valeurs maximales de  $b$ ,  $l$  et des caractéristiques du sol avec les valeurs minimales des autres paramètres et vice-versa. La courbe d'endommagement moyenne est quant à elle obtenue avec la moyenne de l'ensemble des paramètres. Pour le bâti avec semelle filante, la courbe d'endommagement minimale est obtenue en combinant les valeurs minimales de la longueur du bâti et des poids unitaires avec les valeurs maximales de la largeur du bâti et des caractéristiques du sol. La courbe maximale est quant à elle obtenue pour les valeurs maximales des paramètres liés au bâti et les valeurs minimales des caractéristiques du sol et la courbe moyenne pour les valeurs moyennes de l'ensemble des paramètres. Le taux d'endommagement est par ailleurs plafonné à la valeur de 1, dès lors que la fonction de performance est supérieure ou égale à 1, la structure étant dans ce cas considérée comme totalement endommagée.

## 5.3.2. Courbes de fragilité

Les courbes de fragilité décrivent la probabilité de défaillance du bâti en fonction de l'intensité de l'aléa, définie ici comme étant le pourcentage d'affouillement par rapport à la largeur du bâti, perpendiculairement au cours d'eau. Afin de calculer cette probabilité de défaillance, la limite entre les deux domaines défaillant et non défaillant est décrite mathématiquement par la fonction de performance  $G(x)$  définie de telle sorte que  $G(x) < 1$  dans le domaine de sûreté et  $G(x) > 1$  dans le domaine de défaillance. La probabilité de défaillance de la structure est alors définie comme étant la probabilité que la réponse de la structure dépasse une valeur seuil :

$$P_f = Pr[G(X) > 1]$$

### a. Critères de défaillance

Les critères de défaillance sont décrits à l'aide des fonctions de performance vues précédemment ; le bâti est ainsi considéré comme non défaillant si  $G \leq 1$  (soit  $G_R \leq 1$  et  $G_S \leq 1$ ) et comme défaillant si  $G > 1$  (soit  $G_R > 1$  ou  $G_S > 1$ ).

### b. Choix des variables aléatoires

Les valeurs retenues dans le cadre du présent projet pour les dimensions du bâti, les poids volumiques et surfaciques des différents matériaux et éléments constituant la construction et les charges d'exploitation sont spécifiées dans le Tableau 10 et soit correspondent à des valeurs caractéristiques soit sont considérées comme des variables aléatoires suivant une loi uniforme.

Dénomination	Symbole	Distribution	Valeurs	Unité	
Largeur du bâti	$b$	Uniforme	U(7;13)	m	
Longueur du bâti	$l$	Uniforme	U(7;13)	m	
Nombre de niveaux habitables du bâti (rez-de-chaussée + étages, non compris sous-sol et combles)	$n$	Fixe	1 ou 2	-	
Hauteur des niveaux habitables et du sous-sol	$h_f, h_b$	Fixe	2.5	m	
Epaisseur de la dalle de fondation	$t_f$	Uniforme	U(0.25;0.3)	m	
Largeur de la semelle de fondation	$b_f$	Uniforme	U(0.4;0.6)	m	
Epaisseur de la dalle du rez-de-chaussée	$t_{gf}$	Uniforme	U(0.1;0.15)	m	
Profondeur hors gel	$d_f$	Uniforme	U(1;1.2)	m	
Poids volumique de la fondation (béton armé)	$\gamma_c$	Fixe	25	kN/m <sup>3</sup>	
Poids surfacique des planchers inter-niveaux autres que le sous-sol et les combles	$\gamma_{fs}$	Uniforme	U(1.8;3)	kN/m <sup>2</sup>	
Poids surfacique du plafond sous les combles	$\gamma_{cw}$	Fixe	1.5	kN/m <sup>2</sup>	
Poids surfacique des murs porteurs extérieurs	Parpaings	$\gamma_{fw}$	Uniforme	U(2.3;3.1)	kN/m <sup>2</sup>
	Briques creuses			U(2.5;3.3)	
	Pierres			U(6.7;9.4)	
	Moellons			U(9;9.7)	
	Béton cellulaire			U(2.6;4.2)	
Poids surfacique des murs porteurs de soubassement	Parpaings pleins ou béton	$\gamma_{bw}$	Uniforme	U(3.4;4.3)	kN/m <sup>2</sup>
Ratio entre surface des baies et surface habitable	$\alpha_{bw}$	Fixe	1/6	-	
Pente de la toiture	$\beta_r$	Uniforme	U(15;30)	%	
			U(8.53;16.7)	°	
Poids surfacique de la toiture	$\gamma_{rw}$	Uniforme	U(0.3;1.2)	kN/m <sup>2</sup>	
Poids surfacique des éléments non-structuraux autres que la toiture	$g_k$	Uniforme	U(0.5;1)	kN/m <sup>2</sup>	
Charge d'exploitation dans les combles non aménagés	$q_{k1}$	Fixe	0	kN/m <sup>2</sup>	
Charge d'exploitation dans les espaces de vie	$q_{k2}$	Fixe	1.5	kN/m <sup>2</sup>	
Charge d'exploitation en sous-sol	$q_{k3}$	Uniforme	U(1.5;2.5)	kN/m <sup>2</sup>	

Tableau 10 : Définition et caractéristiques des variables intervenant dans le calcul des actions supportées par la fondation d'une habitation de type radier ou semelle filante

Les poids surfaciques considérés in fine dans notre étude sont, pour chaque type de matériau, considérés comme des variables aléatoires suivant une loi uniforme dont les paramètres correspondent aux valeurs inférieure et supérieure du Tableau 5.

### c. Méthode d'élaboration

Chaque courbe de fragilité est établie par itérations successives, comme présenté à la Figure 48, d'une part sur l'intensité d'aléa et d'autre part, pour chaque intensité d'aléa donnée, sur les caractéristiques du bâti voire du sol. Pour une intensité d'aléa donnée, la méthode par simulations de Monte-Carlo est utilisée pour calculer la probabilité de défaillance  $P_f$  de la structure, sur la base d'un échantillon de  $n = 10\ 000$  jeux de données, correspondant à différentes valeurs des caractéristiques du bâti voire du sol et élaboré selon la méthode d'échantillonnage par hypercube latin. Pour une intensité d'aléa donnée, les fonctions de performance de renversement et de portance du sol ainsi que la fonction de performance globale sont donc calculées pour chaque jeu de données de l'échantillon de taille  $n$  auquel on affecte *in fine* une variable booléenne  $I$  égale à 0 si la valeur de la fonction de performance globale est inférieure ou égale à 1 et égale à 1 si cette valeur est supérieure à 1. Pour chaque intensité d'aléa, la probabilité de défaillance est alors égale au nombre de cas défaillants obtenus parmi les 10 000 simulations réalisées à partir des  $n$  valeurs de l'échantillon pour l'intensité d'aléa en question (correspondant à la somme des 10 000 valeurs booléennes) divisé par la taille  $n$  de cet échantillon (Équation 32).

$$P_f = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I(G > 1)$$

Équation 32 : Formule de calcul de la probabilité de défaillance à partir de simulations Monte-Carlo

avec  $P_f$  : probabilité de défaillance ;  
 $n$  : taille de l'échantillon ;  
 $I(.)$  : fonction indicatrice qui vaut 1 lorsque son argument est vrai et 0 dans le cas contraire.

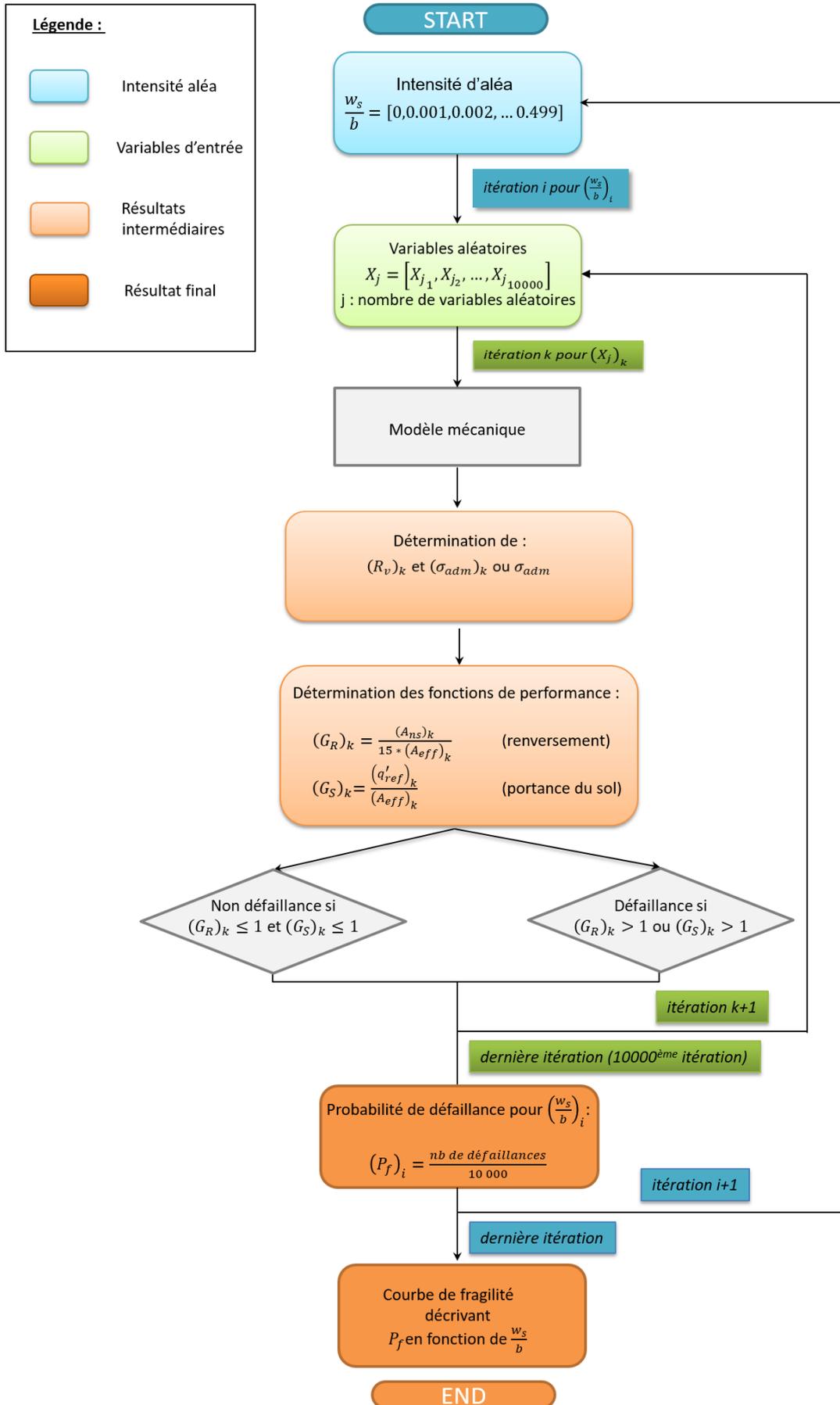


Figure 48 : Méthode d'établissement des courbes de fragilité par simulations Monte-Carlo adapté d'après (Ousset et al. 2022)

## 6. Résultats

### 6.1. Estimation de $R_V$

Afin de s'assurer de la pertinence des valeurs retenues pour les caractéristiques des matériaux, les valeurs de charges ont été estimées pour différents cas de figure de bâti d'une surface au sol fixée arbitrairement à la valeur de 100 m<sup>2</sup> en prenant en compte d'une part les valeurs minimales et d'autre part les valeurs maximales des paramètres de dimensionnement et des poids ou charges surfaciques.

Les résultats, présentés au Tableau 12, sont comparés aux valeurs communément admises présentées au Tableau 11.

Type d'habitation	Maison de plain-pied	Maison sur sous-sol	Maison sur sous-sol + étage
Masse en tonnes	140 à 180	180 à 230	250 à 300
Poids en kN <sup>2</sup>	1 400 à 1 800	1 800 à 2 300	2 500 à 3 000

Tableau 11 : Ordres de grandeur du poids (en kN) d'une habitation d'une surface au sol de 100 m<sup>2</sup> (Source : Construire Habitat)

La moyenne des résultats obtenus pour le poids de maisons de plain-pied avec fondation de types radier et semelle-filante, autres qu'en moellons et en pierres, est globalement du même ordre de grandeur que les poids annoncés au Tableau 11, à savoir compris entre 1 400 et 1 800 kN.

Les valeurs minimales des poids des habitations sur sous-sol avec ou sans étage obtenues par le modèle établi dans la présente étude correspondent également assez bien aux valeurs annoncées au Tableau 11, à savoir respectivement 1 800 et 2 500 kN ; a contrario, les valeurs maximales obtenues par notre modèle sont un peu élevées mais vont dans le sens de la sécurité.

Les actions calculées dans le Tableau 12 (avec leurs valeurs minimales et maximales compte-tenu des hypothèses faites sur les matériaux) sont les suivantes :

$G_{11}$  correspond au poids propre de la fondation en béton armé (radier ou semelle filante) ;

$G_{12}$  correspond au poids propre des différents planchers et dalle (dalle du rez-de-chaussée, planchers inter-niveaux et plancher sous toiture) ;

$G_{13}$  correspond au poids propre des murs porteurs (murs extérieurs et de soubassement) ;

$G_1$  correspond au poids propre de la structure porteuse :  $G_1 = G_{11} + G_{12} + G_{13}$  ;

$G_2$  correspond au poids propre des éléments non-structuraux (toiture, cloisons, doublages, plafonds suspendus et éléments techniques tels que les installations de chauffage, d'eau, d'électricité, ...). Sont ici distingués  $G_{21}$  correspondant au poids propre de la toiture et  $G_{22}$  correspondant au poids propre des éléments non structuraux ;

$Q$  représente la charge variable qui est constituée dans notre cas uniquement des charges (ou surcharges) d'exploitation associées à l'occupation de la construction (on distingue p.m.  $q_{k1}$  : charge d'exploitation dans les combles en N/m<sup>2</sup> ;  $q_{k2}$  : charge d'exploitation dans les espaces de vie en N/m<sup>2</sup> ;  $q_{k3}$  : charge d'exploitation en sous-sol en N/m<sup>2</sup>) ;

$R_V$  correspond à la résultante verticale des actions (somme de toutes les actions ci-dessus).

<sup>2</sup> Valeur de g arrondie à 10 m.s<sup>-2</sup>

Cas étudié	$G_{11}$		$G_{12}$		$G_{13}$		$G_1$		$G_{21}$		$G_{22}$		$G_2$		$Q$		$R_v$				
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max			
Habitation plain-pied avec semelle filante	Parpaings	105	240	400	525	300	420	805	1185	30	120	50	100	80	220	150	150	1035	1555		
		Briques creuses	105	240	400	525	320	435	825	1200	30	120	50	100	80	220	150	150	1055	1570	
		Pierres	105	240	400	525	685	990	1190	1755	30	120	50	100	80	220	150	150	1420	2125	
	Moellons	105	240	400	525	885	1020	1390	1785	30	120	50	100	80	220	150	150	1620	2155		
		Béton cellulaire	105	240	400	525	325	520	830	1285	30	120	50	100	80	220	150	150	1060	1655	
		Parpaings	625	750	400	525	305	435	1330	1710	30	120	50	100	80	220	150	150	1560	2080	
	Habitation plain-pied avec vide sanitaire et radier	Briques creuses	625	750	400	525	320	455	1345	1730	30	120	50	100	80	220	150	150	1575	2100	
			Pierres	625	750	400	525	685	1010	1710	2285	30	120	50	100	80	220	150	150	1940	2655
			Moellons	625	750	400	525	885	1035	1910	2310	30	120	50	100	80	220	150	150	2140	2680
	Habitation sur sous-sol	Béton cellulaire	625	750	400	525	330	535	1355	1810	30	120	50	100	80	220	150	150	1585	2180	
			Parpaings	625	750	400	525	540	710	1565	1985	30	120	100	200	130	320	300	400	1995	2705
			Briques creuses	625	750	400	525	560	730	1585	2005	30	120	100	200	130	320	300	400	2015	2725
Habitation sur sous-sol + étage	Pierres	625	750	400	525	925	1285	1950	2560	30	120	100	200	130	320	300	400	2380	3280		
		Moellons	625	750	400	525	1125	1310	2150	2585	30	120	100	200	130	320	300	400	2580	3305	
		Béton cellulaire	625	750	400	525	565	810	1590	2085	30	120	100	200	130	320	300	400	2020	2805	
Habitation sur sous-sol + étage	Parpaings	625	750	580	825	730	970	2035	2545	30	120	150	300	180	420	430	525	2545	3490		
		Briques creuses	625	750	580	825	765	1005	1970	2580	30	120	150	300	180	420	430	525	2580	3525	
		Pierres	625	750	580	825	1480	2065	2685	3640	30	120	150	300	180	420	430	525	3295	4585	
Habitation sur sous-sol + étage	Moellons	625	750	580	825	1875	2120	3080	3695	30	120	150	300	180	420	430	525	3690	4640		
		Béton cellulaire	625	750	580	825	785	1160	1990	2735	30	120	150	300	180	420	430	525	2600	3680	

Tableau 12 : Estimation de la charge globale  $R_v$  en kN pour quelques cas de figure de bâti avec combles non aménagés et toiture à 2 pans de surface au sol égale à 100 m<sup>2</sup>

## 6.2. Courbes d'endommagement

Les courbes d'endommagement proposées ici décrivent l'évolution du taux d'endommagement correspondant à la fonction de performance globale ( $G = \max(G_R, G_S)$ ) bornée entre 0 et 1, en fonction de l'intensité d'aléa correspondant ici au taux de largeur de bâti affouillée ( $\frac{w_s}{b}$ ). Elles sont établies pour des valeurs fixes des paramètres liés au bâti (dimensions, poids) et des caractéristiques du sol ( $p_{te}^*$ ,  $i_\beta$ ) conduisant aux courbes d'endommagement enveloppes et moyennes.

Remarque: le choix du taux de largeur affouillée égal à  $\frac{w_s}{b}$  comme variable définissant l'intensité de l'aléa est délibéré car ce rapport est établi à partir de grandeurs qui peuvent être estimées facilement par un observateur. Il faut cependant garder à l'esprit que ce rapport ne correspond pas au même ratio d'affouillement (surface affouillée/surface totale de la fondation) pour une fondation de type radier et de type semelle filante (voir tableaux en annexes, Tableau 17, Tableau 18). A valeur égale, ce ratio sera plus important pour une semelle filante.

### 6.2.1. Etude paramétrique

Avant d'établir les courbes d'endommagement caractéristiques, une étude paramétrique a été réalisée en vue d'analyser l'influence des différentes variables intervenant dans le calcul de la fonction de performance, à savoir :

- la largeur du bâti ( $b$ ) ;
- la longueur du bâti ( $l$ ) ;
- les différents paramètres intervenant uniquement dans le calcul du poids propre du bâti : épaisseur de la dalle de fondation ( $t_f$ ) ou largeur de la semelle de fondation ( $b_f$ ), épaisseur de la dalle du rez-de-chaussée ( $t_{gf}$ ), profondeur hors gel ( $d_f$ ), poids surfacique des planchers inter-niveaux ( $\gamma_{fs}$ ), poids surfacique des murs porteurs extérieurs ( $\gamma_{fw}$ ) et de soubassement ( $\gamma_{bw}$ ), pente ( $\beta_r$ ) et poids surfacique ( $\gamma_{rw}$ ) de la toiture et poids surfacique des éléments non-structuraux autres que la toiture ( $g_k$ ) ;
- les caractéristiques du sol portant : pression limite du sol ( $p_{te}^*$ ) et coefficient minorateur lié à la proximité d'une pente ( $i_\beta$ ).

Cette étude est réalisée à l'ELU transitoire sur une habitation de plain-pied, tous matériaux confondus, avec une fondation d'une part de type radier et d'autre part de type semelle filante. Les variables autres que celles dont on étudie l'influence sont à chaque fois prises égales à leur valeur moyenne.

#### • Influence de la longueur ( $l$ ) et de la largeur ( $b$ ) du bâti

Selon les Figure 49 a et Figure 50 a, il apparaît que les dimensions au sol du bâti avec une fondation de type radier ont très peu d'influence sur les courbes d'endommagement mais que la courbe d'endommagement la moins pénalisante (i.e. pour laquelle le taux d'endommagement est le plus faible) est toutefois obtenue pour les largeurs et longueurs du bâti maximales. Cela s'explique par le fait que l'augmentation du poids du bâti induite par l'augmentation de ces dimensions est plus que compensée par l'augmentation de la surface de la fondation et donc par une mobilisation de la capacité portante du sol plus importante.

Dans le cas d'une fondation de type semelle filante (Figure 49 b et Figure 50 b), les dimensions au sol du bâti ont une plus forte influence. La courbe d'endommagement minimale est obtenue dans tous les cas pour la longueur minimale du bâti. A contrario, elle est obtenue pour la largeur minimale du bâti uniquement pour des taux d'affouillement faibles. Pour des taux d'affouillement globalement supérieurs au taux d'affouillement correspondant à un affouillement dépassant la largeur de semelle et se traduisant par une cassure au niveau de la courbe, la courbe d'endommagement la moins pénalisante est obtenue pour la largeur de l'habitation maximale et la longueur minimale.

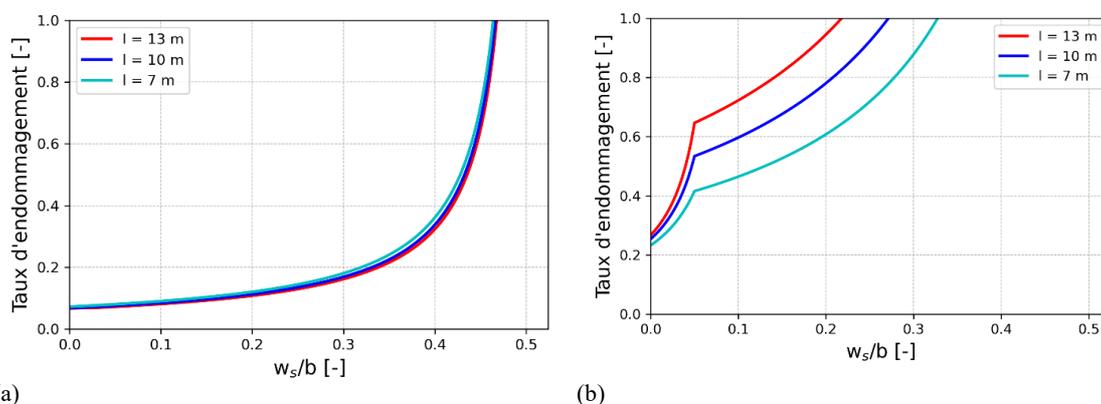


Figure 49 : Influence (à l'ELU transitoire) de la longueur du bâti sur les courbes d'endommagement par affouillement d'une habitation de plain-pied, tous matériaux confondus, avec une fondation de type (a) radier et (b) semelle filante

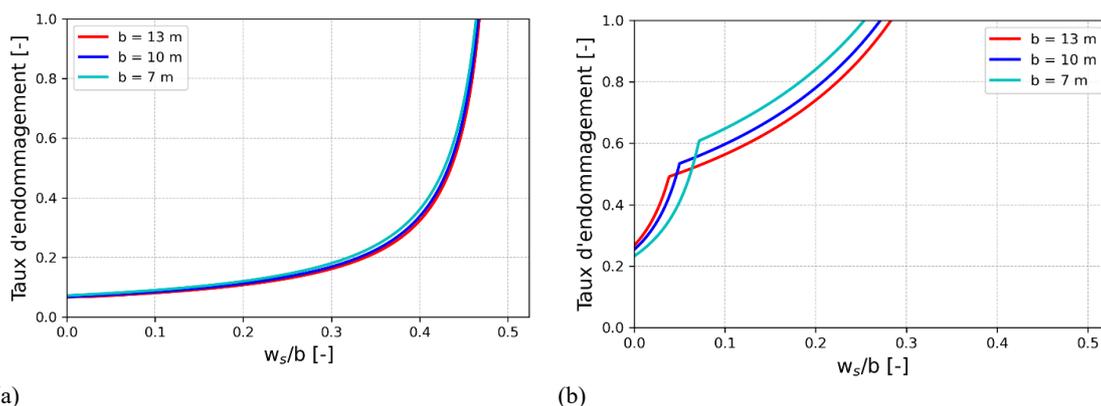


Figure 50 : Influence (à l'ELU transitoire) de la largeur du bâti (dimension selon laquelle est analysé l'affouillement) sur les courbes d'endommagement par affouillement d'une habitation de plain-pied, tous matériaux confondus, avec une fondation de type (a) radier et (b) semelle filante

- Influence des autres paramètres (épaisseurs dalles et planchers, profondeur hors gel, poids spécifiques)

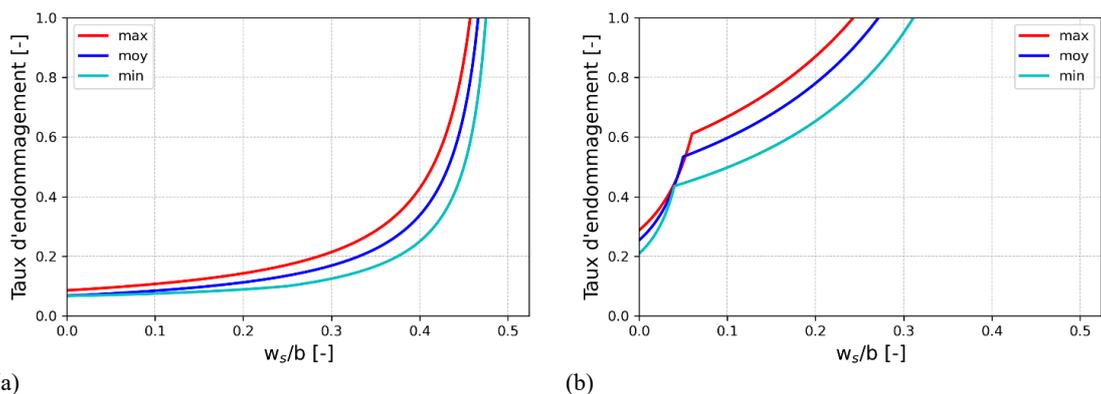


Figure 51 : Influence (à l'ELU transitoire) des caractéristiques du bâti intervenant dans le calcul de son poids et autres que ses dimensions au sol (épaisseurs dalles et planchers, poids spécifiques...), sur les courbes d'endommagement par affouillement d'une habitation de plain-pied, tous matériaux confondus, avec une fondation de type (a) radier et (b) semelle filante

Les autres paramètres de dimensionnement du bâti n'intervenant que dans le calcul du poids propre et donc par une augmentation du poids propre et donc par une augmentation du taux d'endommagement, comme illustré

à la Figure 51.

- **Influence des caractéristiques du sol**

La Figure 52 montre logiquement, pour les deux types de fondation, que la courbe d'endommagement minimale est obtenue pour les sols dont la capacité portante est maximale, soit pour la pression limite du sol et un coefficient minorateur lié à la proximité d'une pente maximums.

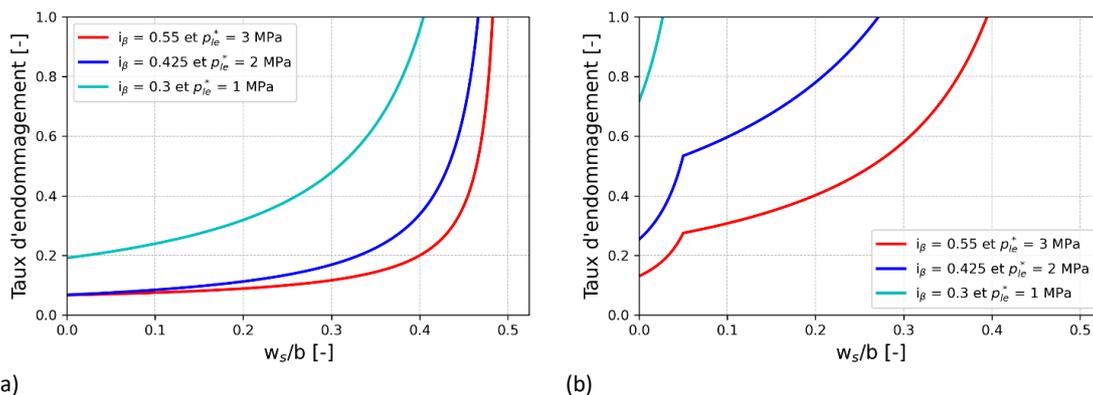


Figure 52 : Influence (à l'ELU transitoire) des caractéristiques du sol de fondation sur les courbes d'endommagement par affouillement d'une habitation de plain-pied, tous matériaux confondus, avec une fondation de type (a) radier et (b) semelle filante

Globalement, il apparaît que l'endommagement par affouillement apparaît plus rapidement dans le cas d'une fondation de type semelle filante (selon les hypothèses de dimensionnement de semelle retenues dans la présente étude) que dans le cas d'une fondation de type radier.

En conclusion, au vu des résultats de l'étude paramétrique réalisée, les courbes d'endommagement présentées ci-après, caractéristiques d'un bâti affouillé en contexte torrentiel, sont établies pour les valeurs fixes des différentes variables telles que présentées au Tableau 13.

Valeurs des variables		Courbes enveloppes					
		Radier			Semelle filante		
		Minimale	Maximale	Moyenne	Minimale	Maximale	Moyenne
Longueur du bâti (l)	minimales		X		X		
	maximales	X				X	
	moyennes			X			X
Largeur du bâti (b)	minimales		X				
	maximales	X			X	X*	
	moyennes						X
Autres paramètres du bâti	minimales	X			X		
	maximales		X			X	
	moyennes			X			X
Caractéristiques du sol	minimales		X			X	
	maximales	X			X		
	moyennes			X			X

Tableau 13 : Valeurs des variables (minimales, maximales ou moyennes) intervenant dans l'établissement des différentes courbes d'endommagement enveloppes (min et max) et moyennes, suivant le type de fondation

\* Dans la mesure où les courbes maximales produites par la suite sont telles que le taux d'endommagement égal à 1 est obtenu pour des valeurs faibles de  $w_s/b$  ( $< w_s/b_s$ ), la courbe d'endommagement maximale est obtenue, comme pour la courbe d'endommagement minimale, pour la valeur de  $b$  maximale (en cohérence avec la Figure 55b).

## 6.2.2. Courbes d'endommagement caractéristiques

Des courbes d'endommagement à l'ELU transitoire et à l'ELU accidentel sont fournies en annexe pour chaque type d'habitation (plain-pied avec radier, plain-pied avec semelle filante, sur sous-sol sans étage, sur vide sanitaire avec un étage et sur sous-sol avec un étage) et chaque type de matériau de construction (en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire, en moellons, en pierres et tous matériaux confondus), tel que présenté au Tableau 14.

ELU	Type bâti	Plain-pied radier	Plain-pied semelle filante	Sous-sol sans étage	Sans sous-sol + 1 étage	Sur sous-sol + 1 étage
	Type murs					
Transitoire	Parpaings, briques, béton	Figure 83 a et Figure 103 a	Figure 87 a et Figure 103 a	Figure 91 a et Figure 103 a	Figure 95 a et Figure 103 a	Figure 99 a et Figure 103 a
	Moellons	Figure 84 a et Figure 104 a	Figure 88 a et Figure 104 a	Figure 92 a et Figure 104 a	Figure 96 a et Figure 104 a	Figure 100 a et Figure 104 a
	Pierres	Figure 85 a et Figure 105 a	Figure 89 a et Figure 105 a	Figure 93 a et Figure 105 a	Figure 97 a et Figure 105 a	Figure 101 a et Figure 105 a
	Tous matériaux	Figure 86 a et Figure 106 a	Figure 90 a et Figure 106 a	Figure 94 a et Figure 106 a	Figure 98 a et Figure 106 a	Figure 102 et Figure 106 a
Accidentel	Parpaings, briques, béton	Figure 83 b et Figure 103 b	Figure 87 b et Figure 103 b	Figure 91 b et Figure 103 b	Figure 95 b et Figure 103 b	Figure 99 b et Figure 103 b
	Moellons	Figure 84 b et Figure 104 b	Figure 88 b et Figure 104 b	Figure 92 b et Figure 104 b	Figure 96 b et Figure 104 b	Figure 100 b et Figure 104 b
	Pierres	Figure 85 b et Figure 105 b	Figure 89 b et Figure 105 b	Figure 93 b et Figure 105 b	Figure 97 b et Figure 105 b	Figure 101 b et Figure 105 b
	Tous matériaux	Figure 86 b et Figure 106 b	Figure 90 b et Figure 106 b	Figure 94 b et Figure 106 b	Figure 98 b et Figure 106 b	Figure 102 b et Figure 106 b

Tableau 14 : Résumé des courbes d'endommagement établies pour du bâti soumis à un risque d'affouillement torrentiel

Des exemples de ces courbes sont fournies aux Figure 53 (habitation de plain-pied avec radier) et Figure 54 (habitation de plain-pied avec semelle filante). La Figure 53 décrit l'évolution du taux d'endommagement, correspondant au maximum des fonctions de performance de renversement et de portance du sol bornées entre 0 et 1, en fonction du taux d'affouillement  $w_s/b$  pour une habitation de plain-pied avec radier, tous matériaux confondus. Dans le cas présenté, les courbes rouge et bleu traduisent l'évolution de la fonction de performance liée à la portance du sol tandis que la courbe cyan correspond à la fonction de performance liée au renversement.

L'atteinte d'un taux d'endommagement égal à l'unité est synonyme de défaillance. Pour un taux d'affouillement donné, ces courbes permettent donc de voir à quel pourcentage de la défaillance se situe la structure. Ainsi, pour un taux d'affouillement de 30 % de la largeur de l'habitation, cette dernière se situe entre environ 10 % (pour le cas le plus favorable)

et 70 % (pour le cas le plus défavorable) de la défaillance à l'ELU transitoire et entre 10 et 50 % à l'ELU accidentel. Par ailleurs, ces courbes d'endommagement indiquent que ce type d'habitation va être défaillante entre 35 et 48 % d'affouillement à l'ELU transitoire et entre 39.5 et 48 % à l'ELU accidentel.

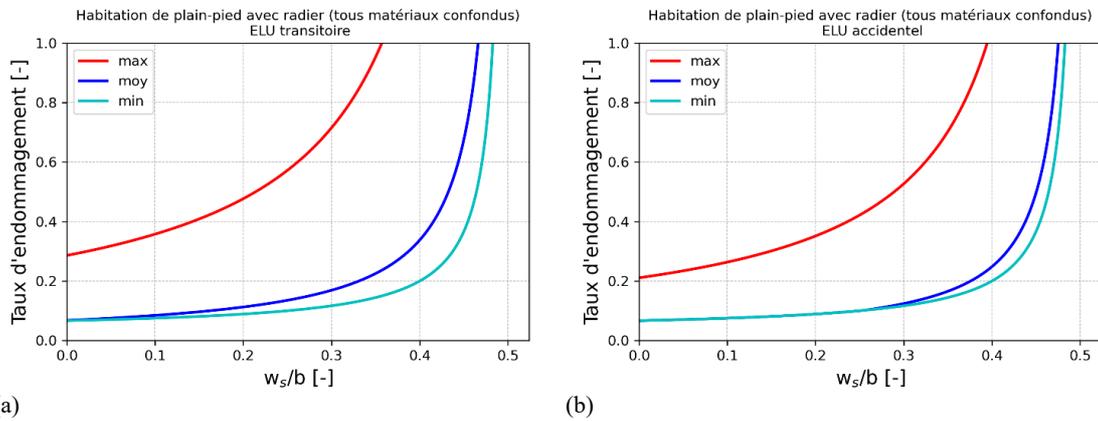


Figure 53 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied avec radier, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

La Figure 54 décrit l'évolution du taux d'endommagement en fonction du taux d'affouillement pour une habitation de plain-pied avec une fondation de type semelle filante. Cette fois, l'ensemble des courbes traduit l'évolution de la fonction de performance liée à la portance du sol. Une cassure est observée lorsque la largeur d'affouillement dépasse la largeur de la semelle soit pour un taux d'affouillement égal à 0.03 pour la courbe minimale (affouillement de largeur égale à celle de la semelle soit 40 cm pour un bâti de largeur 13 m) et à 0.05 pour la courbe moyenne (affouillement de largeur égale à celle de la semelle soit 50 cm pour un bâti de largeur 10 m). Dans le cas le plus défavorable correspondant à un sol de caractéristiques  $i_\beta = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa, l'habitation est très rapidement défaillante. Dans la réalité, ce genre de fondation n'est concevable que sur des sols de meilleure qualité. La gamme de taux d'affouillement conduisant à la défaillance est de ce fait plus étendue que pour une habitation avec une fondation de type radier.

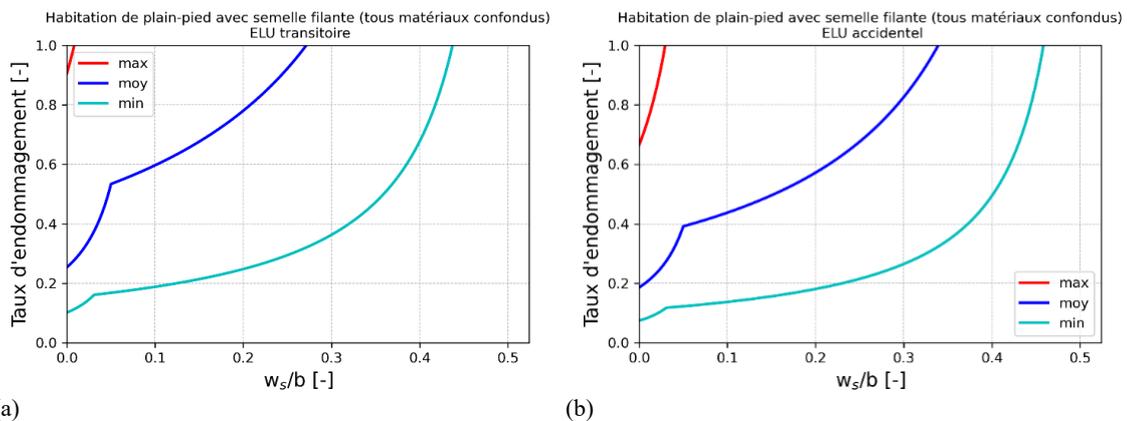


Figure 54 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied avec semelle filante, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

La Figure 55 récapitule l'ensemble des courbes enveloppes des différentes catégories d'habitations étudiées, tous matériaux confondus, et permet d'illustrer les gammes d'intensités d'affouillement pouvant conduire à la défaillance. Pour les différents types d'habitation avec radier, l'enveloppe minimale est la même du fait qu'elle correspond à la fonction de performance liée au renversement qui ne dépend que des surfaces de fondation.

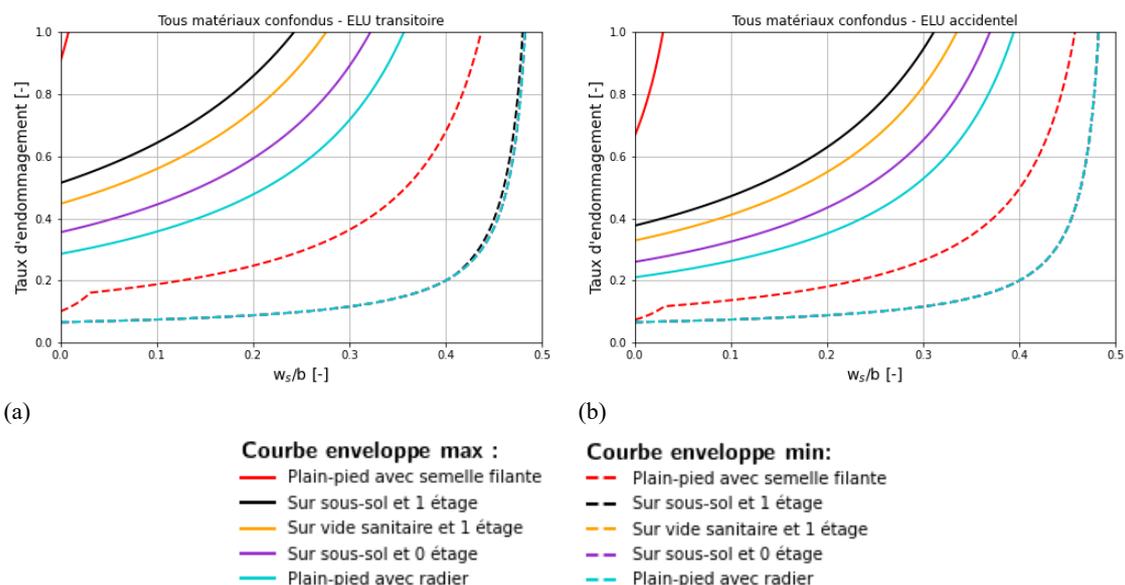


Figure 55 : Courbes d'endommagement enveloppes pour les différents types d'habitation étudiés, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

Un récapitulatif des gammes de taux d'affouillement conduisant à la défaillance est fourni au Tableau 15 et à la Figure 56 par type d'habitation et type de matériau de construction, aux ELU transitoire et accidentel.

Type d'habitation	Type de matériau	Taux d'affouillement $w_s/b$ conduisant à la défaillance (%)			
		ELU transitoire		ELU accidentel	
		minimal	maximal	minimal	maximal
Plain-pied radier	Parpaings & autres	39.0	48.2	41.9	48.2
	Moellons	35.6	48.2	39.4	48.2
	Pierres	35.8	48.2	39.5	48.2
	Tous matériaux	35.6	48.2	39.5	48.2
Plain-pied semelle	Parpaings & autres	2.5	43.8	4.1	45.8
	Moellons	0.8	39.1	2.9	42.4
	Pierres	0.9	40.7	3.0	43.6
	Tous matériaux	0.8	43.8	2.9	45.8
Vide sanitaire + 1 étage	Parpaings & autres	34.0	48.2	38.3	48.2
	Moellons	27.6	47.6	33.5	48.2
	Pierres	27.9	47.8	33.8	48.2
	Tous matériaux	27.6	48.2	33.5	48.2
Sous-sol sans étage	Parpaings & autres	35.5	48.2	39.4	48.2
	Moellons	32.2	48.0	36.9	48.2
	Pierres	32.4	48.2	37.1	48.2
	Tous matériaux	32.2	48.2	36.9	48.2
Sous-sol + 1 étage	Parpaings & autres	30.7	48.0	35.9	48.2
	Moellons	24.2	47.3	31.1	48.0
	Pierres	24.6	47.5	31.4	48.2
	Tous matériaux	24.2	48.0	31.1	48.2

Tableau 15 : Taux d'affouillement minimal et maximal conduisant à la défaillance pour différents types d'habitation et types de matériau de construction aux ELU de portance du sol et de renversement en situations transitoire et accidentelle

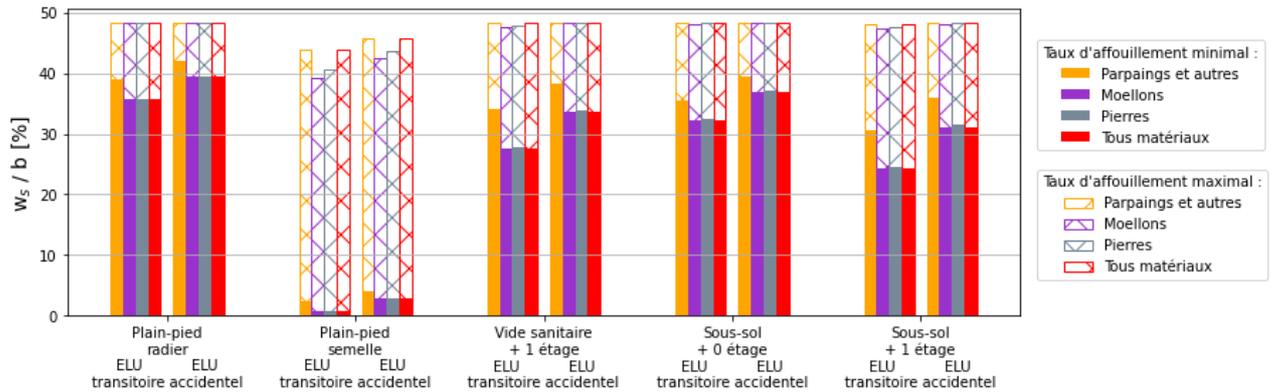


Figure 56 : Taux d'affoulement minimal et maximal conduisant à la défaillance pour les différents types d'habitation étudiés (habitations de plain-pied avec fondation de type radier et de type semelle filante, et avec l'hypothèse d'un radier : habitation sur vide sanitaire avec un étage, habitation sur sous-sol sans étage et habitation sur sous-sol avec un étage) avec, pour chaque type de bâti, ces taux calculés à l'ELU transitoire (à gauche) et à l'ELU accidentel (à droite) pour différents types de matériau de construction

### 6.2.3. Synthèse

On observe que, pour toutes les configurations étudiées ci-dessus, les taux d'endommagement pour une semelle filante sont toujours beaucoup plus élevés que pour une semelle de type radier. Ceci s'explique logiquement par le fait qu'à largeur  $w_s$  d'affoulement égale, la surface affouillée représente une part beaucoup plus importante de la surface totale pour une semelle filante que pour une fondation de type radier (voir tableaux en annexes, Tableau 17, Tableau 18). On observe que le type de fondation est logiquement plus déterminant que la nature des matériaux de construction.

Les différentes courbes permettent de mettre en évidence l'influence du type et de la hauteur du bâtiment sur le taux d'endommagement par affoulement.

## 6.3. Courbes de fragilité

Les courbes de fragilité fournies ci-dessous décrivent l'évolution de la probabilité de défaillance par défaut de portance du sol ou renversement, en fonction de l'intensité d'aléa correspondant au taux de largeur de bâti affouillée ( $\frac{w_s}{b}$ ). Elles sont établies en propageant les incertitudes sur les paramètres liés au bâti (dimensions, poids) ainsi que, dans certains cas, sur les caractéristiques du sol ( $p_{le}^*$ ,  $i_\beta$ ).

### 6.3.1. Etude paramétrique

Cette étude paramétrique est réalisée pour une habitation de plain-pied avec une fondation de type radier.

#### a. Influence du type ou catégorie de murs

La Figure 57 présente les courbes de fragilité obtenues à l'ELU transitoire pour une habitation de plain-pied avec une fondation de type radier construite avec différents types de matériau, dans les conditions de sol les plus défavorables, à savoir pour un sol dont les caractéristiques sont  $i_\beta = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa. On note l'influence du poids volumique des matériaux : plus il augmente plus la probabilité de défaillance augmente, à taux d'affoulement égal.

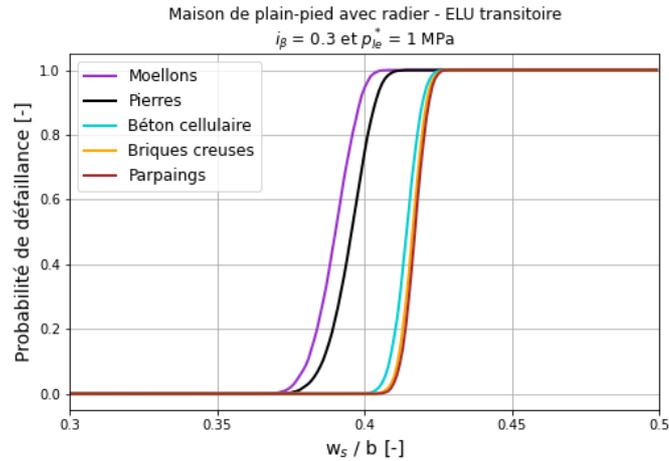


Figure 57 : Influence du type de murs sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier, à l'ELU transitoire et pour  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa

Certaines courbes étant très proches, un regroupement en deux catégories de murs: pierres et moellons d'une part et parpaings, briques creuses et béton cellulaire d'autre part, a été testé, tel que présenté à la Figure 58.

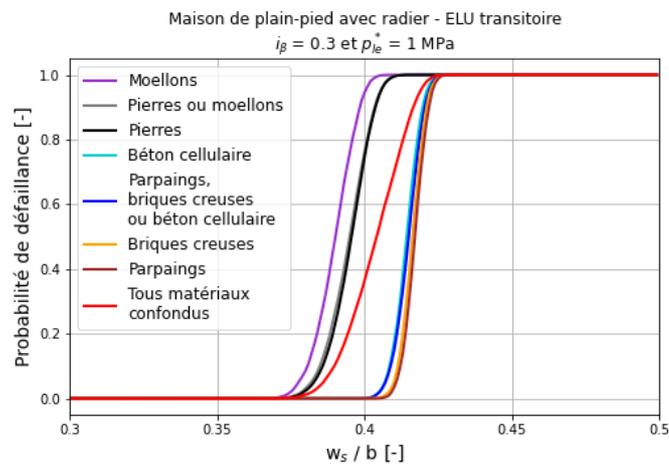


Figure 58 : Courbes de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier pour différents types ou catégories de murs, à l'ELU transitoire et pour  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa

La courbe de fragilité obtenue pour des habitations dont les murs sont indifféremment en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire étant très proche des courbes spécifiques à chacun de ces types de matériaux et allant dans le sens de la sécurité, dans la suite de l'étude, une seule courbe de fragilité est présentée pour ces trois types de murs, comme c'est le cas à la Figure 59. A contrario, les deux courbes de fragilité obtenues pour les moellons et les pierres sont conservées, la courbe de fragilité obtenue pour les moellons étant plus pénalisante que celle obtenue pour la catégorie de murs regroupant les pierres et les moellons.

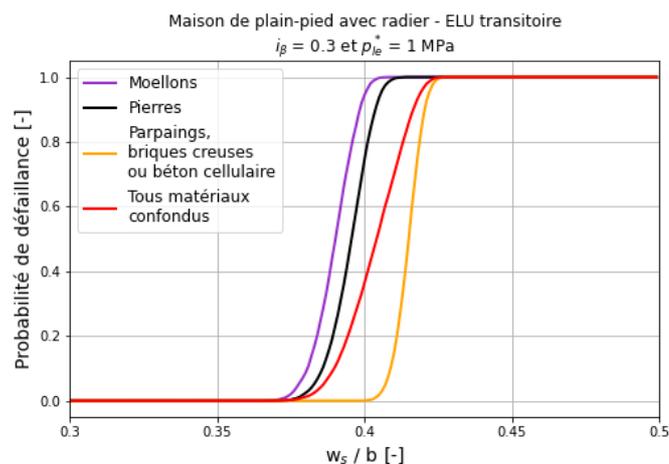


Figure 59 : Courbes de fragilité à retenir pour une habitation de plain-pied avec radier pour différentes catégories de murs, à l'ELU transitoire et pour  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa

D'après la Figure 59, on peut voir que pour un taux d'affouillement donné, plus le poids propre de l'habitation est fort, plus la probabilité de défaillance est forte. Par exemple, pour un taux d'affouillement de 0.4, la probabilité de défaillance est nulle pour une habitation en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire, tandis qu'elle est proche de 1 pour une habitation en moellons. En pratique, il est donc important, dans une étude de risque, de bien distinguer les habitations par leur matériau de construction.

### b. Influence des caractéristiques du sol

La Figure 60 présente l'influence importante des caractéristiques du sol sur les courbes de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier pour différentes catégories de matériau de construction. Moins le sol est résistant et plus le taux d'affouillement conduisant à une probabilité de défaillance donnée est faible. Il est à noter que, dans le cas d'une habitation en parpaings, briques ou béton et un sol dont les caractéristiques correspondent aux valeurs maximales  $i_{\beta} = 0.55$  et  $p_{le}^* = 3$  MPa, la défaillance est obtenue par renversement (courbe verticale correspondant à un taux d'affouillement égal à 0.482, comme précisé à l'Équation 27), tandis que pour tous les autres cas, la défaillance est due à un défaut de portance du sol. La détermination des caractéristiques du sol étant difficile sur le terrain, il est prudent *in fine* de retenir les courbes obtenues pour les caractéristiques minimales du sol.

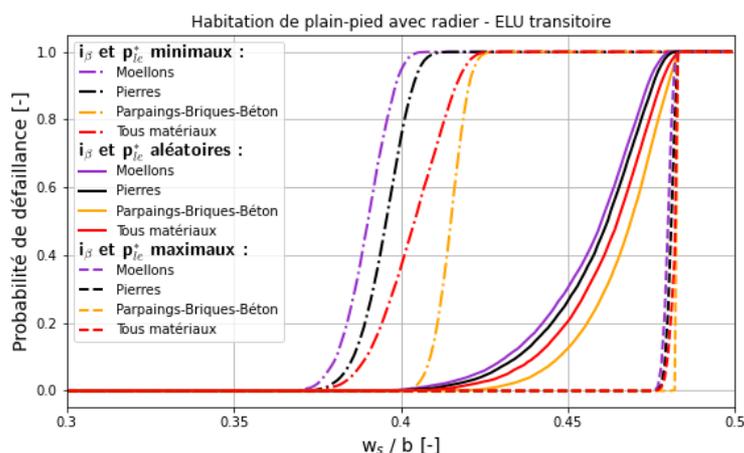


Figure 60 : Courbes de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier à l'ELU transitoire pour différents types de murs et différentes caractéristiques de sol (valeurs de  $i_{\beta}$  et  $p_{le}^*$  minimales :  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa, aléatoires et maximales :  $i_{\beta} = 0.55$  et  $p_{le}^* = 3$  MPa)

L'influence détaillée des caractéristiques du sol est précisée en annexe (Figure 108 à Figure 110) pour les différentes habitations de plain-pied avec radier classées par type de murs.

On note l'influence essentielle des caractéristiques du sol sur le taux d'endommagement. Le fait que les paramètres soient par essence difficiles à déterminer avec précision démontre l'intérêt et l'utilité de l'utilisation de courbes de fragilité : ces

courbes permettent de prendre en compte et de visualiser l'influence de paramètres de calcul tels que les caractéristiques des sols sur la stabilité des bâtiments affouillés.

### c. Influence des situations de projet (transitoire et accidentelle)

La situation de projet transitoire fait référence à des conditions temporaires d'exposition du bâti tandis que la situation de projet accidentelle fait référence à des conditions exceptionnelles. L'ELU transitoire se traduit par la prise en compte de coefficients de sécurité dans le calcul des charges tandis que, pour la situation accidentelle, la charge globale calculée correspond à la charge réelle s'exerçant sur la fondation.

Il en résulte, comme illustré à la Figure 61, dans le cas d'un sol dont les caractéristiques sont les plus défavorables, que la probabilité de défaillance dépend de la situation de projet considérée. Globalement, le passage de l'ELU transitoire à l'ELU accidentel se traduit par une translation des courbes de fragilité selon l'axe des abscisses d'une valeur de  $\frac{w_s}{b}$  d'environ 0.025.

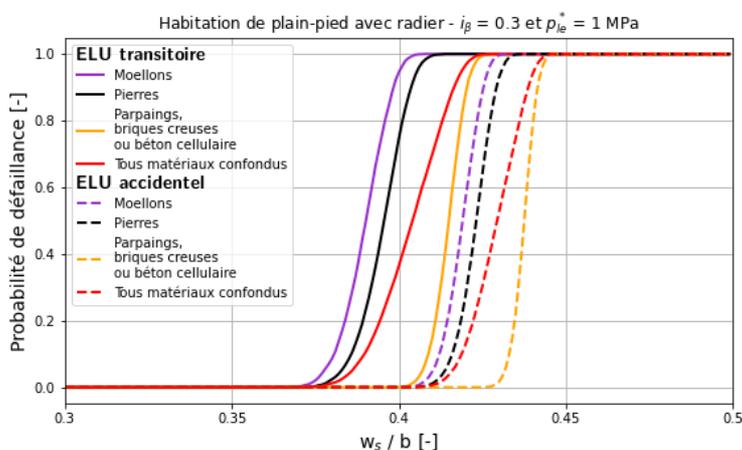


Figure 61 : Influence des états limites ultimes (ELU) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier, pour  $i_\beta = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa et différents types de murs

## 6.3.2. Courbes de fragilité caractéristiques

Les courbes de fragilité caractéristiques établies pour les différents types d'habitation et catégories de matériau de construction sont présentées ci-dessous et en annexe.

La Figure 62 récapitule les courbes de fragilité obtenues pour les différents types d'habitation avec une fondation de type radier, tous matériaux confondus, dans les conditions de sol les plus critiques, à savoir  $i_\beta = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa. On peut voir que plus l'habitation comporte de niveaux habitables, plus la probabilité de défaillance est importante et que la présence d'un étage est plus défavorable que la présence d'un sous-sol.

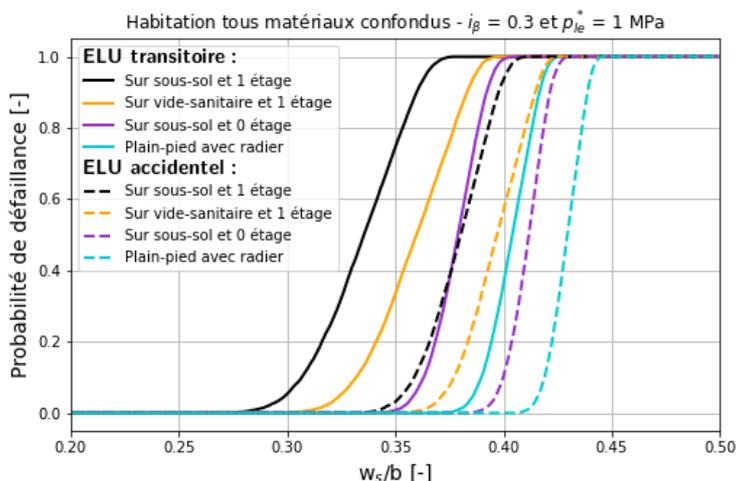


Figure 62 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti avec une fondation de type radier (sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage), tous matériaux confondus, pour  $i_\beta = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa

Le cas d'une habitation de plain-pied avec une fondation de type semelle filante n'apparaît pas à la Figure 62, ce type de fondation n'étant pas compatible avec un sol de caractéristiques  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{1e}^* = 1$  MPa. Un sol a minima de caractéristiques  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{1e}^* = 1.5$  MPa peut permettre l'utilisation d'une fondation de type semelle filante dans le cas d'une habitation de plain-pied. Les courbes de fragilité sont dans ce cas telles que présentées à la Figure 63. Le cas d'une habitation de plain-pied avec une fondation de type semelle filante n'apparaît pas à la Figure 62, ce type de fondation n'étant pas compatible avec un sol de caractéristiques  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{1e}^* = 1$  MPa. Un sol a minima de caractéristiques  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{1e}^* = 1.5$  MPa peut permettre l'utilisation d'une fondation de type semelle filante dans le cas d'une habitation de plain-pied. Les courbes de fragilité sont dans ce cas telles que présentées à la Figure 63.

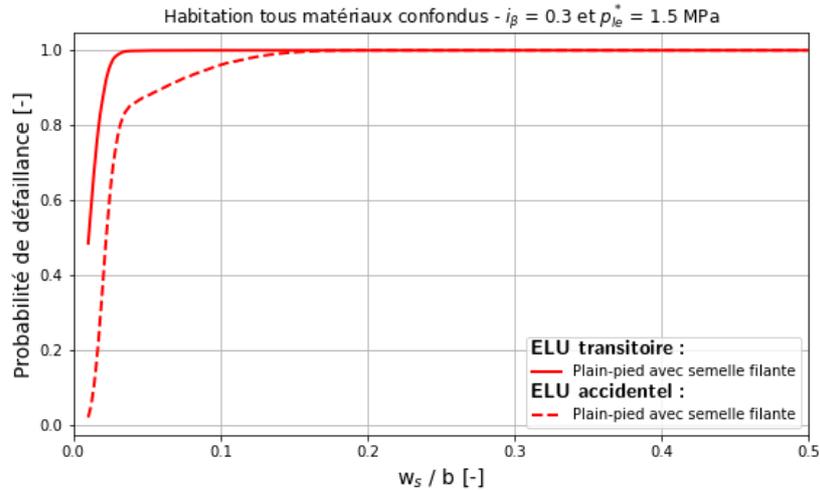


Figure 63 : Courbes de fragilité d'une habitation de plain-pied avec une fondation de type semelle filante, tous matériaux confondus, pour  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{1e}^* = 1.5$  MPa

La Figure 64 présente les courbes de fragilité obtenues pour les différents types d'habitation, tous matériaux confondus, quel que soit le type de sol.

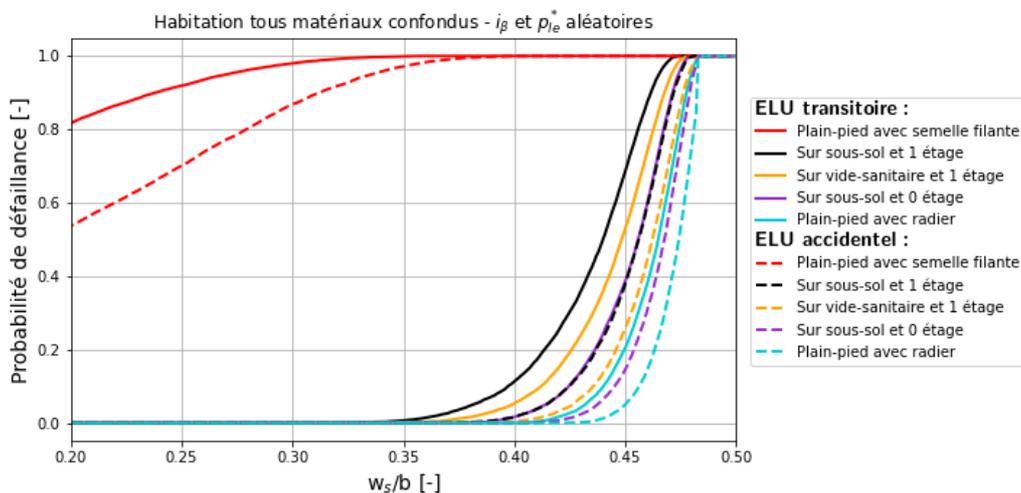


Figure 64 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti (plain-pied avec radier ou semelle filante, habitation sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage), tous matériaux confondus, pour  $i_{\beta}$  et  $p_{1e}^*$  aléatoires

La Figure 65 récapitule les courbes de fragilité obtenues pour les deux types d'habitation de plain-pied (fondation de type radier et fondation de type semelle filante), tous matériaux confondus, dans les conditions de sol les plus favorables, à savoir  $i_{\beta} = 0.55$  et  $p_{1e}^* = 3$  MPa. Lorsqu'une habitation avec une fondation de type semelle filante est construite sur ce type de sol, sa défaillance sera due à un problème de portance du sol observé pour des taux d'affouillement entre 0 et 42 % tandis que

la défaillance des différents types d'habitations avec une fondation de type radier va dans tous les cas être due à un renversement pour un taux d'affouillement de 48.2 %.

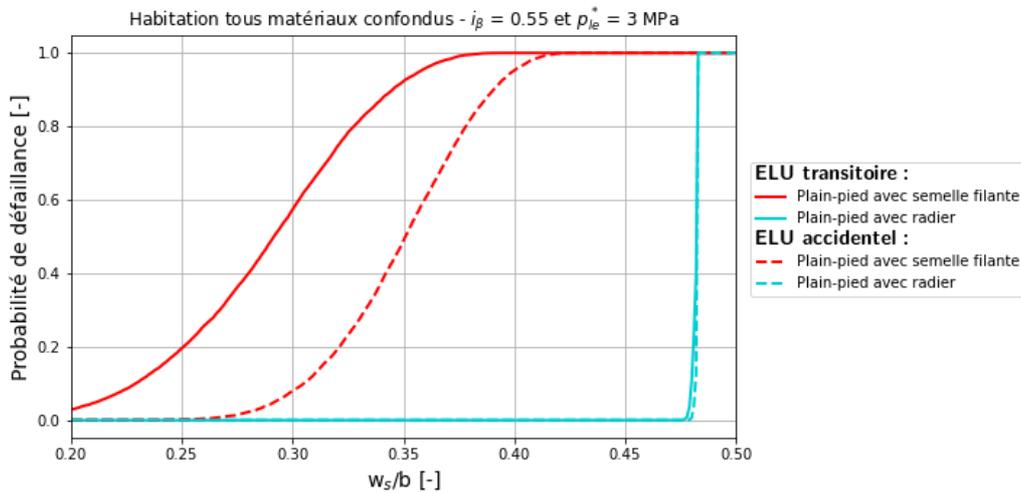


Figure 65 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti (plain-pied avec radier ou semelle filante), tous matériaux confondus, pour  $i_{\beta} = 0.55$  et  $p_{ie}^* = 3$  MPa

### 6.3.3. Récapitulatif des courbes de fragilité établies

Le récapitulatif des courbes de fragilité réalisées aux ELU transitoire et accidentel pour les différents types de bâti et les différents types de sols étudiés est présenté au Tableau 16.

ELU	Caractéristiques sol	Type bâti		Plain-pied radier	Plain-pied semelle filante	Sous-sol sans étage	Sans sous-sol + 1 étage	Sur sous-sol + 1 étage
		Type murs						
Transitoire	$i_{\beta} = 0.3$ et $p_{ie}^* = 1$ MPa	Moellons		Figure 57, Figure 58, Figure 59, Figure 60, Figure 61, Figure 108 et Figure 127	Figure 114	Figure 121 et Figure 127	Figure 123 et Figure 127	Figure 125 et Figure 127
		Pierres		Figure 57, Figure 58, Figure 59, Figure 60, Figure 61, Figure 109 et Figure 128	Figure 116	Figure 121 et Figure 128	Figure 123 et Figure 128	Figure 125 et Figure 128
		Parpaings, briques, béton		Figure 57, Figure 58, Figure 59, Figure 60, Figure 61, Figure 107 et Figure 129	Figure 112	Figure 121 et Figure 129	Figure 123 et Figure 129	Figure 125 et Figure 129
		Tous matériaux		Figure 58, Figure 59, Figure 60, Figure 61, Figure 62, Figure 110 et Figure 130	Figure 63 (avec $p_{ie}^* = 1.5$ MPa) et Figure 118	Figure 62, Figure 121 et Figure 130	Figure 62, Figure 123 et Figure 130	Figure 62, Figure 125 et Figure 130
	$i_{\beta} = 0.55$ et $p_{ie}^* = 3$ MPa	Moellons		Figure 60 et Figure 108	Figure 114			
		Pierres		Figure 60 et Figure 109	Figure 116			

ELU	Caractéristiques sol	Type bâti	Plain-pied radier	Plain-pied semelle filante	Sous-sol sans étage	Sans sous-sol + 1 étage	Sur sous-sol + 1 étage	
		Type murs						
		Parpaings, briques, béton	Figure 60 et Figure 107	Figure 112				
		Tous matériaux	Figure 60, Figure 64 et Figure 110	Figure 64 et Figure 118	Figure 64	Figure 64	Figure 64	
	Aléatoires	Moellons	Figure 60, Figure 108 et Figure 111			Figure 122	Figure 124	Figure 126
		Pierres	Figure 60, Figure 109 et Figure 111			Figure 122	Figure 124	Figure 126
		Parpaings, briques, béton	Figure 60, Figure 107 et Figure 111			Figure 122	Figure 124	Figure 126
		Tous matériaux	Figure 60, Figure 64, Figure 110 et Figure 111	Figure 64	Figure 64 et Figure 122	Figure 64 et Figure 124	Figure 64 et Figure 126	
	Accidentel	$i_\beta=0.3$ et $p_{le}^*=1$ MPa	Moellons	Figure 61 et Figure 127	Figure 115	Figure 121 et Figure 127	Figure 123 et Figure 127	Figure 125 et Figure 127
			Pierres	Figure 61 et Figure 128	Figure 117	Figure 121 et Figure 128	Figure 123 et Figure 128	Figure 125 et Figure 128
			Parpaings, briques, béton	Figure 61 et Figure 129	Figure 113	Figure 121 et Figure 129	Figure 123 et Figure 129	Figure 125 et Figure 129
			Tous matériaux	Figure 61, Figure 62 et Figure 130	Figure 63 (avec $p_{le}^*=1.5$ MPa) et Figure 119	Figure 62, Figure 121 et Figure 130	Figure 62, Figure 123 et Figure 130	Figure 62, Figure 125 et Figure 130
$i_\beta=0.55$ et $p_{le}^*=3$ MPa		Moellons			Figure 115			
		Pierres			Figure 117			
		Parpaings, briques, béton			Figure 113			
		Tous matériaux	Figure 64	Figure 64 et Figure 119	Figure 64	Figure 64	Figure 64	Figure 64
Aléatoires		Moellons	Figure 111			Figure 122	Figure 124	Figure 126
		Pierres	Figure 111			Figure 122	Figure 124	Figure 126
		Parpaings, briques, béton	Figure 111			Figure 122	Figure 124	Figure 126
		Tous matériaux	Figure 64 et Figure 111	Figure 64	Figure 64	Figure 64 et Figure 122	Figure 64 et Figure 124	Figure 64 et Figure 126

Tableau 16 : Synthèse des courbes de fragilité établies pour du bâti soumis à un risque d'affouillement torrentiel

## 7. Conclusion

L'action a d'abord permis de décrire les configurations de structures (structure, type de fondations) exposées aux phénomènes torrentiels (affouillement notamment) dans le contexte initial du bâti. Ensuite, pour les deux configurations de bâtiment envisagées, l'étude a permis de :

- Construire les modèles analytiques de stabilité externe et interne et de défaillance des structures ;
- Caractériser des indicateurs, seuils d'endommagement selon les équilibres considérés (construction des courbes de vulnérabilité décrivant le potentiel d'endommagement) ;
- Construire des courbes de fragilité des structures.

Pour mémoire, on signale que l'analyse des données de retour d'expérience existantes en matière de description des cas d'affouillement n'a malheureusement pas permis une exploitation complète dans le cadre d'une approche de type génie civil. Cette situation reste à l'heure actuelle assez fréquente. Elle peut s'expliquer par les conditions dans lesquelles les observations post-catastrophe sont réalisées. De manière générale, les experts intervenant en première phase sont souvent des spécialistes des phénomènes. De fait, les aspects de génie civil sont souvent moins bien couverts et documentés dans les retours d'expérience que les descriptions liées aux phénomènes. Il y a donc ici des pistes de progrès importantes et possiblement une réflexion à mener pour orienter, former les experts de manière à pouvoir collecter les informations qui seront utiles par la suite pour mettre en œuvre des approches telles que celle proposée dans le présent rapport. Les sections suivantes décrivent successivement les apports, les limites de l'approche et les perspectives.

### 7.1. Apports

La première phase du projet correspond à la conception et l'application de modèles analytiques complétés par une analyse probabiliste dans le cas de structure de type bâti exposé à des phénomènes d'affouillement.

Le travail réalisé a permis de produire les éléments suivants :

- Formalisation des contextes, notations ;
- Rappel de la méthodologie de détermination du niveau de risque : aléa, endommagement, dommage, risque ;
- Rappel des principes de calcul et de justification de la stabilité externe ;
- Complément et précisions par rapport au guide PPR torrent au niveau de la terminologie relative à l'affouillement (propositions de notations, schémas manquants). L'approche proposée étend les approches essentiellement hydrauliques développées dans le guide en abordant des problématiques de type génie civil, peu développées jusqu'à présent ou alors de manière assez qualitative et générale (cf. par exemple les guides « Construire en montagne ») ;
- Rappel et principes de description des méthodes de construction des courbes d'endommagement ;
- Rappel et description des configurations et scénarios d'affouillement possibles ;
- Méthodologie de prise en compte des contraintes en fondations pour les deux types de fondations les plus courants dans un contexte d'habitation : fondations de type radier et de type semelle filante plus ou moins enterrée ;
- Explication et discussion des modèles de répartition des contraintes en fondation pour des fondations de type radier et semelle filante partiellement affouillées ;
- Proposition de modèles de calcul simplifiés monodimensionnels ;
- Méthodologie de calcul des centres de gravité pour envisager les calculs dans des configurations bidimensionnelles d'affouillement ;
- Proposition de courbes d'endommagement (approche analytique) ;
- Proposition de courbes de vulnérabilité (fragilité) intégrant l'incertitude sur les paramètres de calcul et correspondant au contexte réel de la connaissance des paramètres sur le terrain dans un contexte de retour d'expérience : pour un niveau d'intensité d'aléa donné, la courbe de fragilité propose une probabilité de défaillance intégrant l'incertitude sur les paramètres du calcul.

Les travaux effectués apportent une approche quantitative des mécanismes et niveaux d'endommagement là où les documents existants tels que les guides Construire en montagne (MEDDTL/DGPR 2010), les guides PPR (MTECT/DGPR 2023) n'abordent pas les aspects de justification de la stabilité des structures.

L'ensemble des rappels et l'explicitation des mécanismes de défaillance est un élément important pour améliorer la compréhension des mécanismes physiques d'endommagement par affouillement et ainsi améliorer sa prise en compte dans les actions de prévention des risques. Ces éléments permettront aux experts, non spécialistes du génie civil, de mieux comprendre les mécanismes et les effets d'évolution morphologique des cours d'eau sur les structures. La démarche a permis de développer à la fois des méthodologies analytiques de vérification de la stabilité externe de fondation soumise à l'affouillement et de mettre en œuvre des méthodes issues de l'analyse de fiabilité des matériaux et structures à ce contexte particulier. L'application de ces approches est innovante : elle permet de prendre en compte l'incertitude sur les paramètres de calcul dans l'estimation du taux d'endommagement de bâtiments affouillés sous la forme de probabilité de défaillance. Ces résultats peuvent ensuite être utilisés dans des approches d'analyse de risque.

## 7.2. Limites de l'approche

L'approche proposée, malgré des résultats importants et conséquents reste cependant partielle et il faut ici rappeler ses limites qui sont autant de pistes d'amélioration. On peut notamment citer :

- Les hypothèses simplificatrices de calcul monodimensionnel de l'affouillement (pas de prise en compte et de calcul d'une configuration d'affouillement d'un angle) ;
- Les hypothèses simplificatrices liées aux choix des modèles de répartition des contraintes en fondations de type Meyerhof qui ne restent que des approches de calcul et ne permettent pas d'obtenir la répartition réelle des contraintes en fondation, les seules utilisables dans le cadre d'une analyse de la stabilité interne ;
- La limitation de l'approche à deux types de fondations (radier et semelle superficielle) ;
- La limitation de l'approche à la seule justification de la stabilité externe sans pouvoir ici aborder la complexité et la diversité.

## 7.3. Perspectives

Les perspectives et suites possibles peuvent être envisagées sur un plan technique et aussi plus opérationnel en termes de transfert, valorisation et intégration ou coordination, le cas échéant, avec d'autres approches et initiatives relatives à la gestion des risques.

### 7.3.1. Aspects techniques

#### Analyse et retour d'expériences

Les données relevées et/ou disponibles à la suite des visites de terrain post-catastrophe sont souvent collectées sur la base d'une analyse phénoménologique au détriment d'informations plus axées sur des problématiques génie civil. Il est assez difficile d'exploiter les données collectées pour caractériser et/ou interpréter les niveaux d'endommagement mentionnés (Figure 66, Figure 67). Une réflexion sur l'amélioration de la collecte des données de type génie civil sur le terrain en phase prévention ou de post-catastrophe serait peut-être utile.

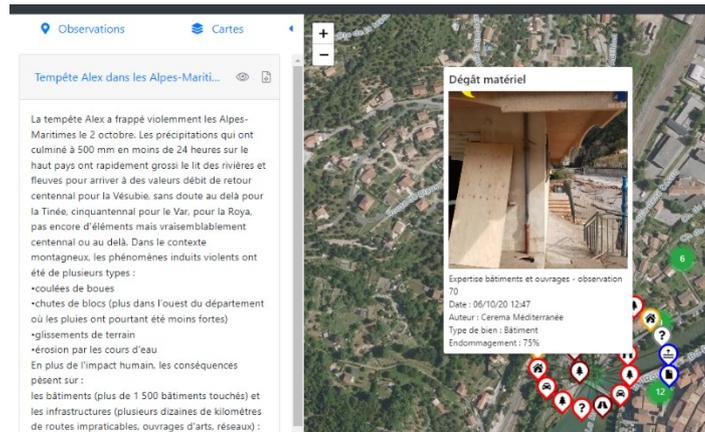


Figure 66 : Exemple d'information collectée et accessible sur la plateforme MUREX (<https://rex.cerema.fr/>)

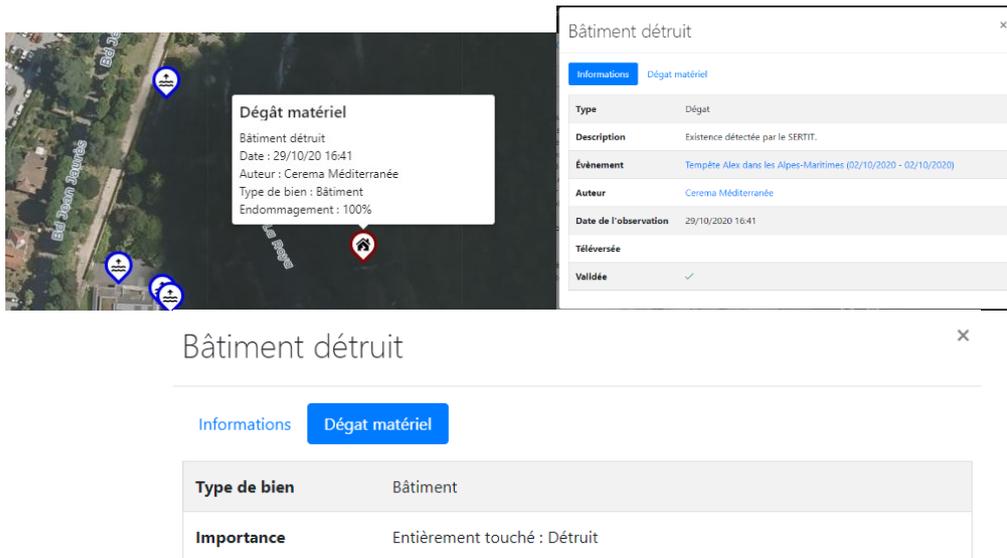


Figure 67 : Exemple d'information collectée et accessible sur la plateforme MUREX (<https://rex.cerema.fr/>)

## Démarches de calculs

Les perspectives suivantes sont à analyser et à discuter en fonction soit de leur intérêt méthodologique et ou opérationnel. Développer des approches plus poussées ne signifie pas forcément qu'elles auront vocation à être mises en œuvre de manière opérationnelle. Elles permettent par contre de connaître l'erreur, de caractériser l'influence des approximations faites en utilisant des approches simplifiées : fait-on une erreur de 5%, 10%, 25 %, 50 % ... ? Connaître ceci permet de discuter les résultats et, le cas échéant, d'affiner les approches dans les cas où les risques sont importants. On peut ainsi imaginer les développements suivants :

- Calculs sur autres types de fondations (fondation semi profondes, sur plots, sur pieux ...) qui représentent cependant des cas marginaux ;
- Calculs avec d'autres gammes de valeurs correspondant aux données relatives aux bâtiments, au contexte géotechnique (hypothèses arbitraires) ;
- Prise en compte de configurations d'affouillement bi-dimensionnelles ;
- Calcul de la répartition réelle des contraintes en fondation (Hypothèse de Navier) : ce calcul permet de déterminer les contraintes en tout point de la fondation affouillée considérée comme une section à une flexion composée. La fondation est considérée comme une section. L'effort normal correspond à la résultante verticale du poids propre et les moments selon les deux directions résultent de l'excentricité par rapport aux axes  $xx'$  et  $yy'$  ;

- Calcul de stabilité interne (fondation, murs) ;
- Création de courbes d'endommagement et de fragilité par approche hybride (prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision) ;
- Le cas échéant, développement et mise à disposition de routines de calcul permettant une utilisation plus facile et une mise en œuvre des calculs par les praticiens et/ou bureaux d'études ;
- Calcul pour d'autres actions et phénomènes ;
- Réflexion sur la qualification des cas de charges pour des bâtiments exposés à des phénomènes torrentiels : la réglementation de justification des bâtiments ne considère pas, par essence, les actions et effets engendrés par un écoulement torrentiel, la suppression d'appui en fondation, ... La question du développement et mise en place de procédures de calcul spécifiques, explicites pour les hommes de l'art de la construction est donc posée pour ces bâtiments susceptibles d'être exposés, en lien avec le zonage réglementaire.

Pour mémoire, d'autres développements utilisant des approches avancées de modélisation seraient possibles, telles que l'utilisation de modèle éléments finis (Abaqus) par exemple, pour obtenir, valider, affiner les courbes de vulnérabilité et de fragilité. L'objectif pourrait être, pour différentes classes de bâtiments, d'établir en fonction de leur typologie et de leurs caractéristiques géométriques, différentes courbes de fragilité décrivant la probabilité de défaillance des structures en fonction des configurations de cas de charges et notamment de l'intensité d'aléa qui pourra être caractérisée par exemple par une hauteur d'eau ou une longueur d'affouillement. Les incertitudes liées à la géométrie de la structure, aux matériaux constitutifs de l'ouvrage ainsi qu'aux caractéristiques du sol en place seraient prises en compte pour obtenir des indicateurs d'efficacité structurale.

### 7.3.2. Transfert et intégration dans les approches d'analyse de risque

L'intérêt de ce type d'approche peut parfois être questionnée. Elle peut sembler très éloignée des préoccupations opérationnelles liées, par exemple, à la réalisation de PPR. Comprendre les mécanismes de manière plus fine, connaître l'influence et l'importance de l'incertitude des paramètres sur les résultats a pourtant un intérêt majeur pour orienter les actions opérationnelles. On peut alors adopter des approches simplifiées mais en connaissant et en ayant conscience de l'incertitude globale sur les résultats. Cela permet de caractériser le niveau de précision, d'incertitude associée aux approches et de le confronter avec les exigences pratiques opérationnelles : il ne sera pas possible de faire un modèle éléments finis pour chaque bâtiment mais on aura déterminé en amont, en fonction de la connaissance disponible, quelle est la pertinence, la précision de la méthode qu'on utilise. Un nombre important de résultats sont disponibles et les valoriser serait intéressant. On peut imaginer les suites décrites ci-dessous :

- Vulgarisation et formation, lien avec les autres approches (Groupe GT AMC) ;
- Mise en évidence et communication de l'intérêt de ce type d'approche en lien avec des démarches d'analyse de risque et de choix des mesures de prévention et protection ;
- Intégration dans des approches opérationnelles de calcul des risques, de construction des plans de prévention des risques avec une approche incrémentale et progressive (du simple, rapide au plus compliqué, détaillé en fonction du contexte, de la nature des enjeux et du type d'expertise) ;
- Intégration et utilisation dans d'autres cadres (analyse coûts bénéfiques, analyse de risque) ;
- Favoriser l'exploitation pratique des résultats, produire des sortes d'abaques ;
- Identifier le seuil à partir duquel on passe du cas où les méthodes issues des inondations restent valides aux situations de rupture (destruction) ;
- Traduire les résultats en termes d'ordres de grandeur (min, max) de l'extension spatiale des zones de sensibilité au phénomène d'affouillement. Par exemple, en prenant une hypothèse de profondeur d'affouillement et de position du pied de talus et des hypothèses sur la nature des fondations des habitations, identifier le niveau de sensibilité au phénomène d'affouillement.

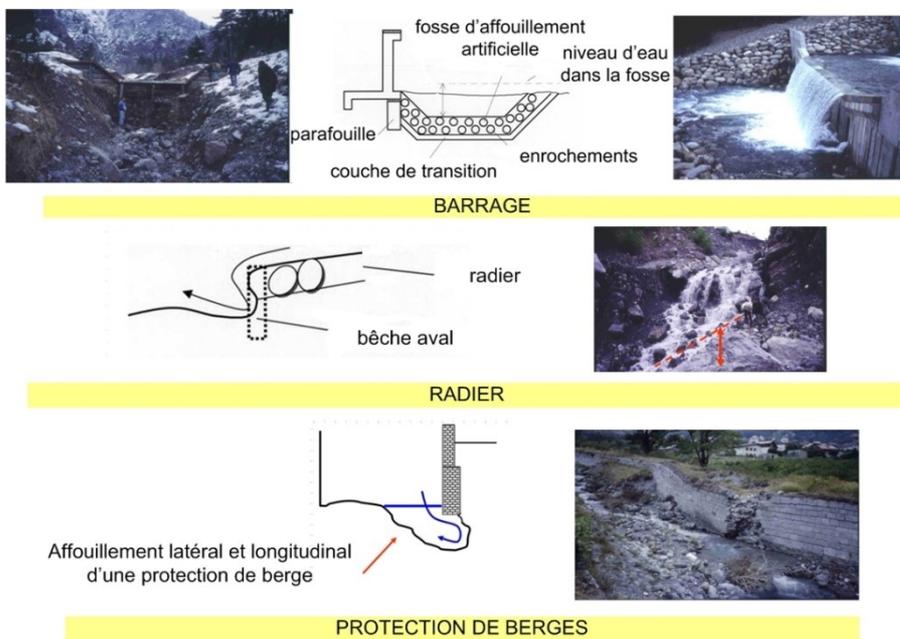
## 8. Références

- AFNOR, 2004. *NF P 06-111-2 : Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 1-1 : Actions générales - Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments.. Annexe nationale à la NF EN 1991-1-1*, Association Française de Normalisation (AFNOR).
- Caillard, B., 2017. *Grand Guide de la Maçonnerie*, Editions BILP.
- Carladous, S., 2017. *Thèse de doctorat - Approche intégrée d'aide à la décision basée sur la propagation de l'imperfection de l'information - application à l'efficacité des mesures de protection torrentielle*. Saint-Étienne, France: ENSM-SE, Sciences et Génie de l'Environnement, 394 p.
- Cerema, 2014. *Guide méthodologique, Eurocode 7, Application aux fondations superficielles (NF P94-261) References*, ed., CEREMA.
- Chahrouh, N. et al., 2021. Deterioration modeling and maintenance assessment using physics-informed stochastic Petri nets: Application to torrent protection structures. *Reliability Engineering and System Safety*, 210.
- Deymier, C., Tacnet, J.-M. & Mathys, N., 1995. *Conception et calcul de barrages de correction torrentielle - Etudes du Cemagref, Série Equipements pour l'eau et l'environnement, num. 18*, Antony, France: Cemagref - Dicova.
- Gupta, S. & Sundaram, R., 2003. In situ testing - Current trends in geotechnical investigations. In *Geotechnical Engineering for Infrastructural Development*. Roorke.
- MEDDTL/DGPR, 2010. *Construire en montagne - La prise en compte du risque torrentiel*, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement - Direction de la prévention des risques.
- METL, 1993. *Règles techniques de conception et de calcul - Calcul des fondations des ouvrages de génie civil - Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux - Fascicule numéro 62 - Titre V*, Ministère de l'Equipement, du Logement et des Transports.
- MTECT/DGPR, 2023. *Guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation pour les cours d'eau torrentiels*, Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires - Direction Générale de la Prévention des Risques.
- ONF-RTM & INRAE, 2022. *Retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans de la Roya, volet torrentiel*, ONF-RTM/INRAE. Available at: <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.57745/B69M20>.
- Ousset, I., Bonnard, E., et al., 2022. Développement d'un package R pour l'établissement de courbes de fragilité. In *11èmes Journées de la Fiabilité des Matériaux et des Structures*. Clermont-Ferrand.
- Ousset, I., Laouiti, A., et al., 2022. Etude fiabiliste d'un barrage de correction torrentielle. In *11èmes Journées de la Fiabilité des Matériaux et des Structures*. Clermont-Ferrand.
- Royet, P. & Peyras, L., 2010. *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*, Irstea.
- Tacnet, J.-M. et al., 2016. Combiner les modèles d'aide à la décision pour la gestion patrimoniale des infrastructures (GPI). *Revue Sciences Eaux et Territoires, Gestion patrimoniale des infrastructures*, 20, pp.90-97.
- Tacnet, J.-M., 2009. *Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (ENSMSE), France.
- Tacnet, J.-M. & Degoutte, G., 2013. Torrents et rivières de montagne - Dynamique et aménagement. In A. Recking, D. Richard, & G. Degoutte, eds. Versailles, France: Quae, pp. 267-331.

## 9. Annexes

### 9.1. Phénomènes et protection contre l'affouillement

Autant des bâtiments ne sont nativement pas conçus pour y résister, les problématiques d'affouillement lié à l'érosion longitudinale du lit et/ou des berges des torrents sont essentielles dans la conception des ouvrages de protection contre les risques torrentiels (Figure 68).



Adapté de J.-M. Tacnet, G. Degoutte, 2013. Principes de conception des ouvrages de protection contre les risques torrentiels, in Recking et al. (Eds) Torrents et rivières de Montagne, Dynamique et Aménagement, Editions Quae.

Figure 68 : Exemples de cas d'affouillement d'ouvrages de protection contre les risques torrentiels

Les conditions hydrauliques et le transport solide sont susceptibles de générer des engravements ou le dépôt d'embâcles redirigeant alors les écoulements vers les berges et provoquant des affouillements de berges (Figure 69).

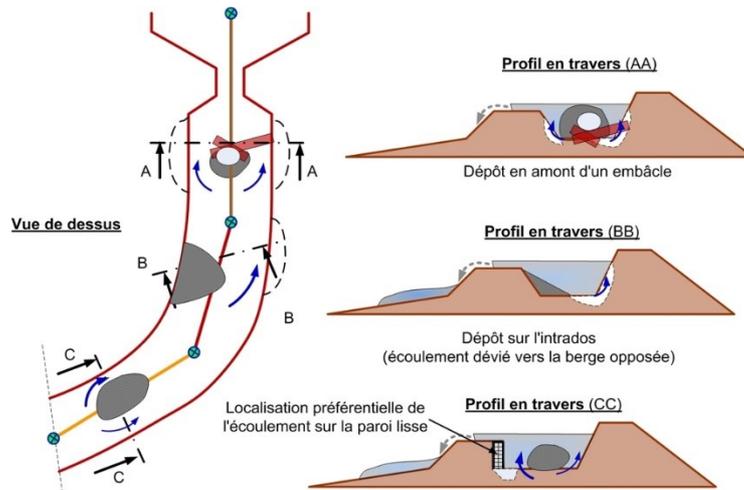


Figure 69 : Localisation et aggravation des zones d'érosion latérale liées à des engravements ou à la présence d'obstacles modifiant les directions d'écoulement (Tacnet & Degoutte 2013)

Dans le cas des ouvrages de protection, les zones d'interface entre différentes rugosités (par exemple entre le terrain naturel et les zones où le revêtement est plus lisse, comme un mur, un enrochement) vont constituer des lieux préférentiels d'érosion. Dans le cas de protection de berge, il est ainsi préconisé d'anticiper l'érosion latérale en ancrant la protection de berge par enrochement dans la berge. Pour accompagner l'érosion longitudinale, la conception de protections de berge par enrochement doit, quant à elle, s'accompagner de la mise en place d'un sabot de pied constitué de gros blocs stabilisant les enrochements posés sur la berge en cas d'incision du lit : les gros blocs s'enfoncent mais leur taille leur permet de rester en place en conservant leur rôle de butée de pied (Figure 70).

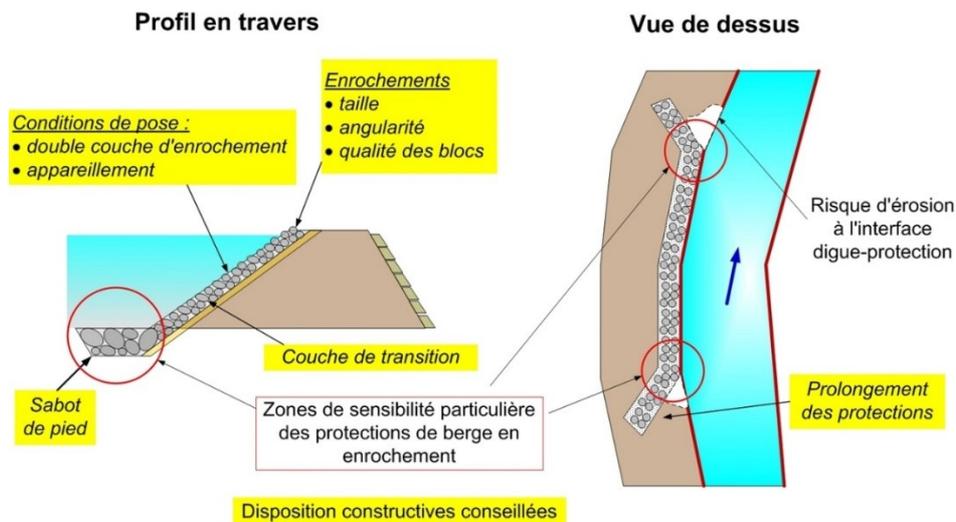


Figure 70 : Dispositions constructives de protection contre l'affouillement latéral et longitudinal de protections de berges en enrochement (Tacnet & Degoutte 2013)

Ces différents phénomènes peuvent être observés à proximité de bâtiment proches des lits torrentiels. Les phases d'érosion longitudinale et latérale vont s'enchaîner ou se combiner simultanément. Plusieurs scénarios sont possibles comme montré ci-dessous.

## 9.2. Calcul d'une fondation de type radier affouillée en bidimensionnel

La configuration correspondant à l'affouillement de l'angle d'une fondation de type radier n'a pas été exploitée pour produire des courbes de vulnérabilité et de fragilité. Une méthodologie a cependant été imaginée pour permettre, le cas échéant, d'effectuer la justification de la stabilité externe dans ce cas. Les sections suivantes décrivent les trois grandes étapes de la démarche :

1. La première étape consiste à déterminer le centre de gravité de la partie de fondation non affouillée ;
2. La seconde étape détermine quelle serait la section rectangulaire ayant le centre de gravité précédemment déterminé ;
3. La troisième étape consiste à effectuer la justification de cette fondation rectangulaire équivalente en utilisant le modèle de Meyerhof.

Cette approche permet de calculer les contraintes.

### 9.2.1. Calcul du centre de gravité de la fondation affouillée en bidimensionnel

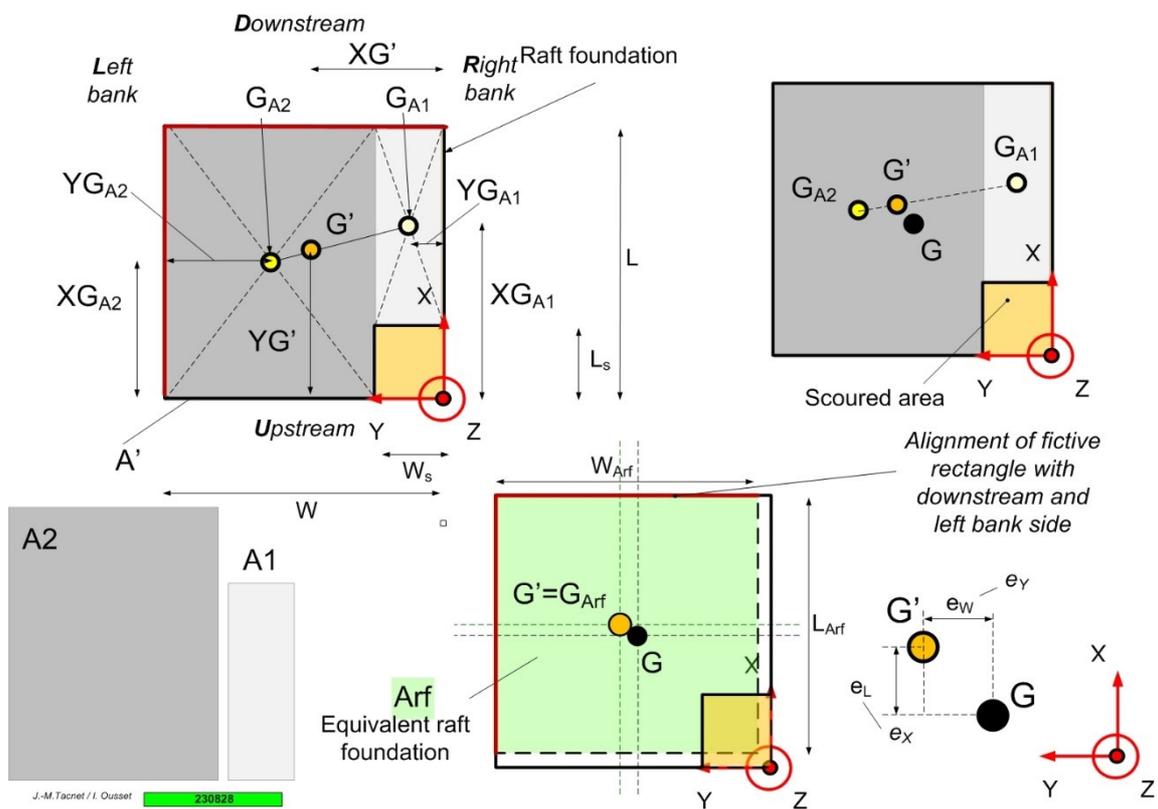


Figure 71 : Calcul de centre de gravité de la surface rectangulaire fictive équivalente à la zone de fondation restant en contact avec le sol après affouillement

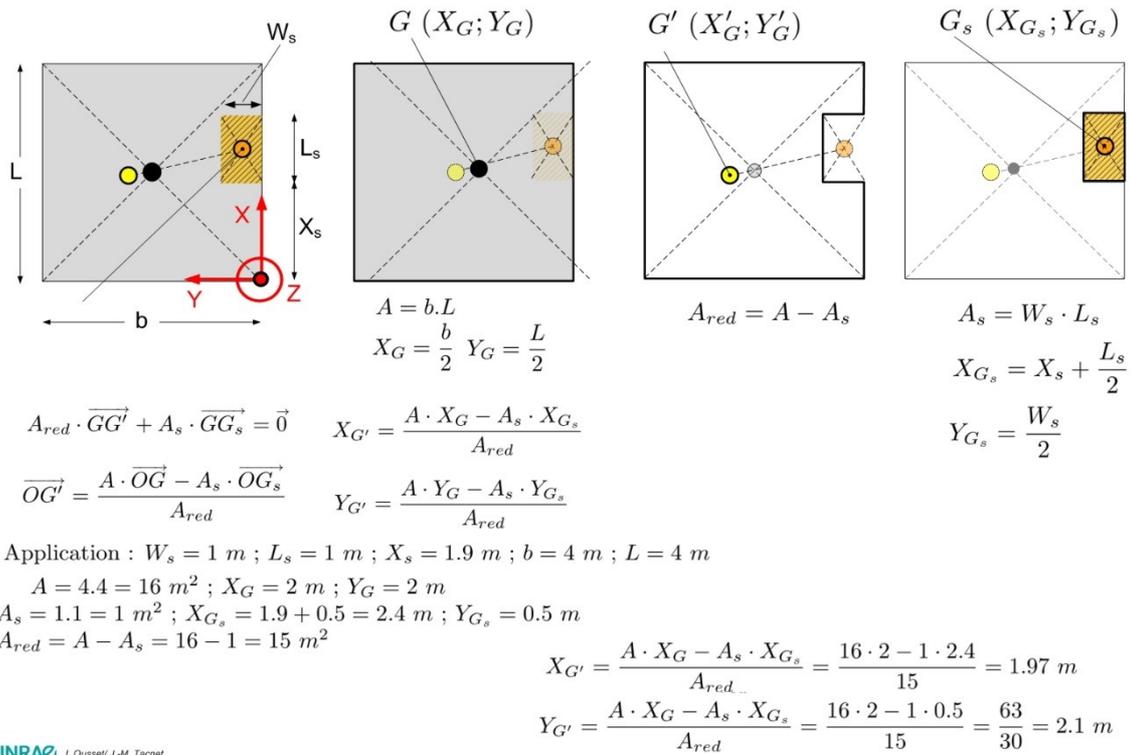


Figure 72 : Calcul du centre de gravité d'une fondation de type radier affouillée de manière quelconque (rectangulaire)

## 9.2.2. Calcul de la réaction du sol sur la base d'une fondation rectangulaire équivalente

En première approche, la fondation est soumise uniquement aux charges verticales dues aux poids propres. La fondation initiale est soumise à un affouillement dans son angle inférieur droit (zone orange rayée). Deux systèmes mécaniques sont équivalents s'ils ont en un point quelconque les mêmes éléments de réduction (effort normal, effort tranchant, moments de flexion, de torsion). La fondation initiale est uniquement soumise au poids propre  $G_1$  appliqué en son centre de gravité  $G$ . Après affouillement, la forme de la fondation réellement en contact avec le sol change. On détermine la fondation rectangulaire (en vert) équivalente à cette surface de fondation étant restée en contact avec le sol. Pour cela, on calcule le centre de gravité  $G'$  de la surface de la fondation réelle étant restée en contact avec le sol. On remplace ensuite la surface au contact du sol par une fondation rectangulaire ( $A_{red}$ ) en conservant l'alignement avec les deux côtés aval et rive gauche de la fondation.

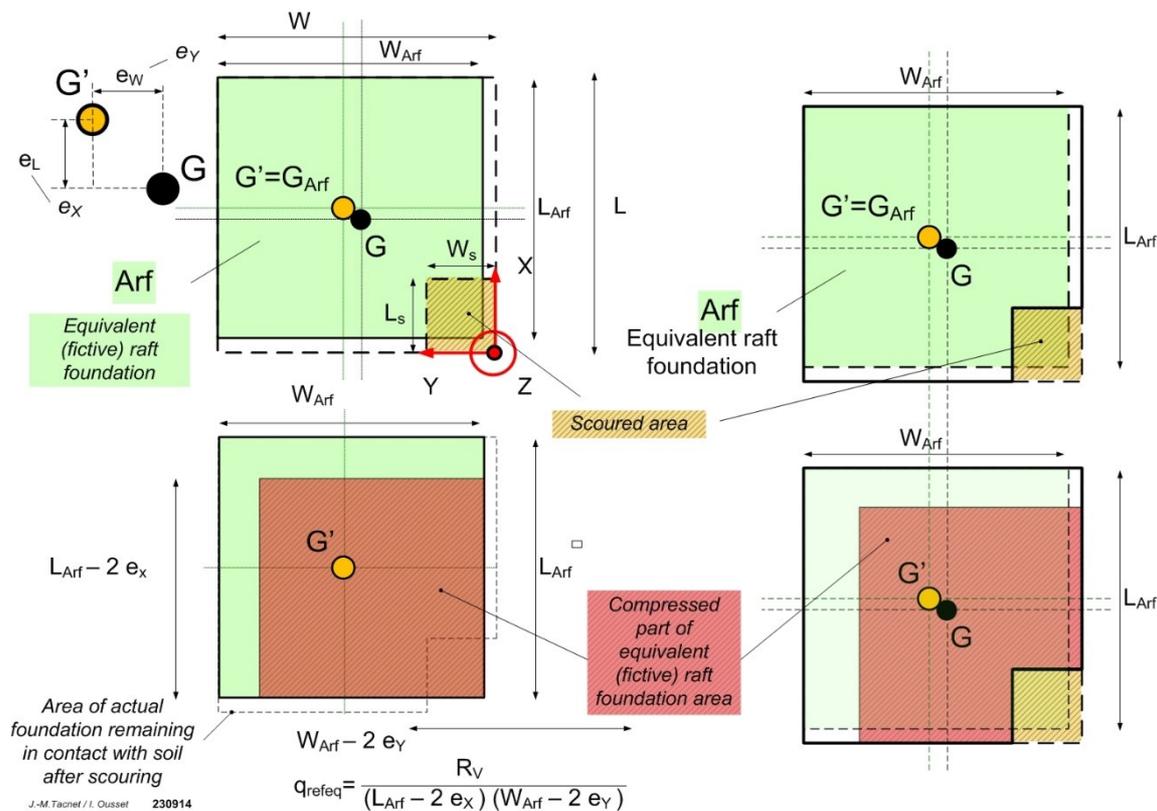


Figure 73 : Principe de détermination d'une fondation rectangulaire équivalente (après affouillement)

La fondation équivalente est soumise à la même résultante verticale (poids propre appliqué en G) avec les mêmes excentricités (et donc moments)  $e_x$  et  $e_y$ . Les systèmes correspondant à la fondation réelle affouillée et la fondation rectangulaire équivalente (Arf) sont donc équivalentes pour analyser la stabilité externe.

La contrainte  $q_{refeq}$  est utilisée pour faire la vérification de la capacité portante des fondations selon les différents états limites.

Il faut néanmoins avoir conscience que la répartition des contraintes issue de cette approche ne correspond pas à la réalité. On est dans la même situation que le modèle de Meyerhof basé sur une hypothèse de répartition uniforme appliquée sur une longueur fictive de semelle qui est une simplification de la répartition réelle des contraintes pouvant être dans la réalité soit trapézoïdale, soit triangulaire. Pour obtenir la forme de la répartition réelle des contraintes, il faut considérer la section de fondation restant en contact avec le sol, calculer son centre de gravité, l'inertie par rapport aux deux axes perpendiculaires passant par le centre de gravité et calculer ensuite les contraintes par rapport aux axes neutres selon une hypothèse de flexion composée.

Important : La démarche globale comprend les étapes suivantes :

1. calcul du centre de gravité  $G'$  de la surface. La position du centre de gravité permet de déterminer les valeurs d'excentricité  $e_x$  et  $e_y$  ;
2. calcul de la contrainte en fondation. Ceci nécessite de déterminer ou de faire une hypothèse sur la forme de la répartition de contraintes en fondation (modèle de Navier ou modèle Meyerhof). Le centre de poussée de cette réaction du sol s'applique au niveau du centre de gravité G et à la même intensité que la résultante du poids propre de la structure. On peut faire l'hypothèse d'une fondation fictive de forme rectangulaire.

### 9.2.3. Vérification : calcul de la répartition réaliste des contraintes en fondation (Hypothèse de Meyerhof)

Le calcul précédent permet de calculer et déterminer quelle serait la fondation rectangulaire équivalente à la fondation

réelle affouillée. Cette équivalence est basée sur la correspondance des centres de gravité. On peut néanmoins facilement constater que la surface de la fondation réelle affouillée et celle de la surface équivalente ne sont pas égales (Figure 74).

Pour calculer la fondation fictive, on a fait l'hypothèse que la fondation fictive a une forme rectangulaire. A partir de là, il y a deux stratégies :

- La première approche consiste à faire l'hypothèse que la surface fictive a la même surface que la fondation initiale à laquelle on soustrait la surface de la zone affouillée. Ceci conduit à rechercher la distance  $d$  entre la fondation initiale et la fondation équivalente en résolvant une équation du second degré. Cette approche permet d'avoir une fondation équivalente ayant la bonne surface mais dont le centre de gravité ne correspond plus à  $G'$ . **Ceci n'est pas satisfaisant** car les valeurs d'excentricité sont alors également faussées ;
- La seconde approche consiste à considérer que la surface équivalente a pour centre de gravité  $G'$  et a une forme rectangulaire. La position de  $G'$  correspond à l'intersection des diagonales et il n'y a donc qu'une et une seule solution. La fondation équivalente obtenue n'a cependant pas la même surface que la fondation initiale à laquelle on aurait enlevé la surface affouillée. La surface de la fondation équivalente s'avèrera toujours y être inférieure. Cela veut dire qu'on majore la contrainte de référence, ce qui va dans le sens de la sécurité. **On conservera donc cette approche.** (en ayant à l'esprit qu'elle ne permet pas d'obtenir la répartition réelle des contraintes en fondation).

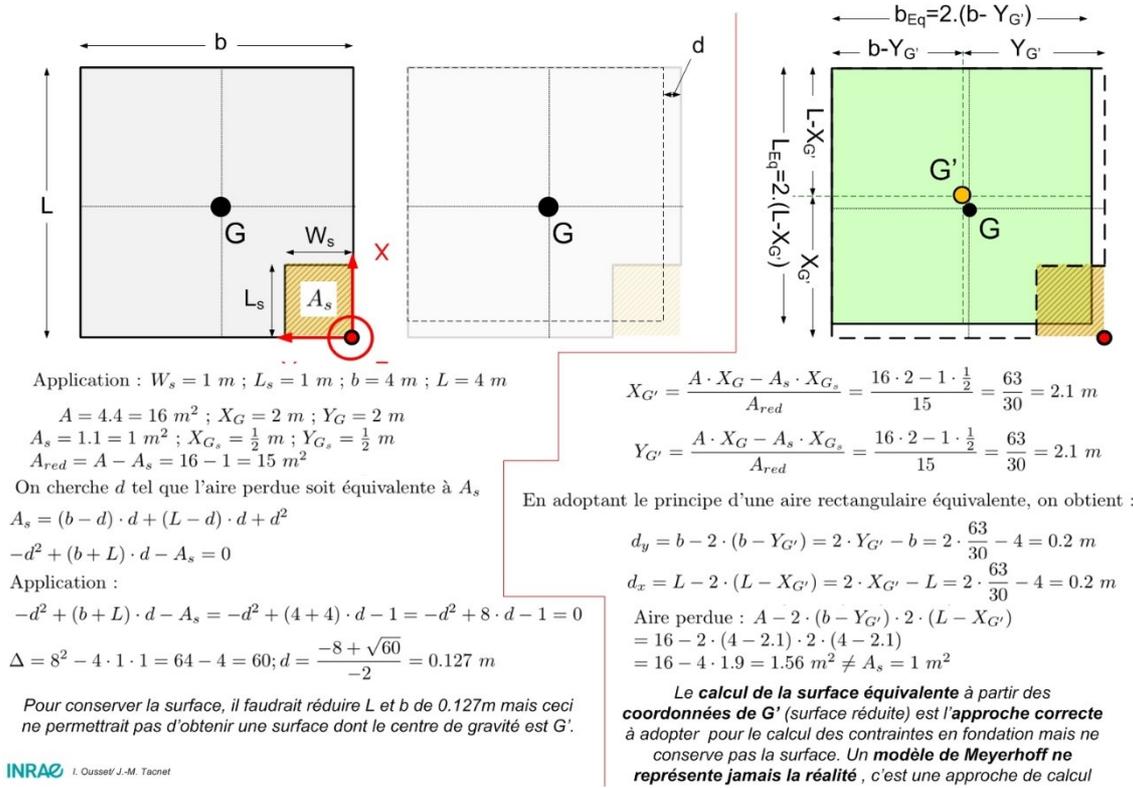


Figure 74 : L'approche de Meyerhof reste une approche de calcul : la répartition des contraintes n'est pas réaliste et la surface n'est pas conservée

Il est donc impossible de remplacer la surface correspondant à la fondation de type radier affouillée par une surface rectangulaire de même surface et ayant le même centre de gravité. Le calcul et la méthodologie sont correctes en termes de valeur de contrainte de référence mais ne doivent pas être utilisés pour conclure quoi que ce soit sur la forme réelle de la répartition des contraintes du sol en fondation. Seul un calcul utilisant une approche de type Navier (calcul des contraintes réelles) permettrait d'obtenir la forme réelle.

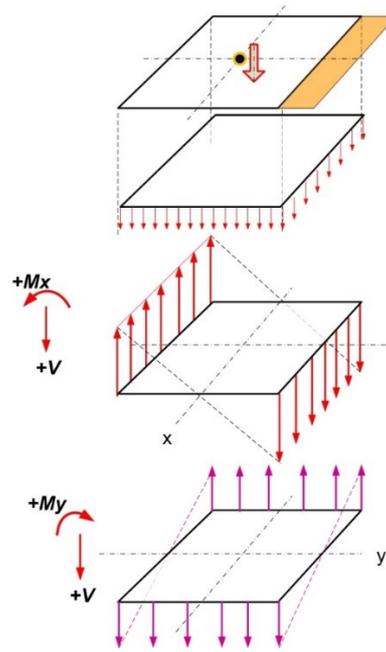
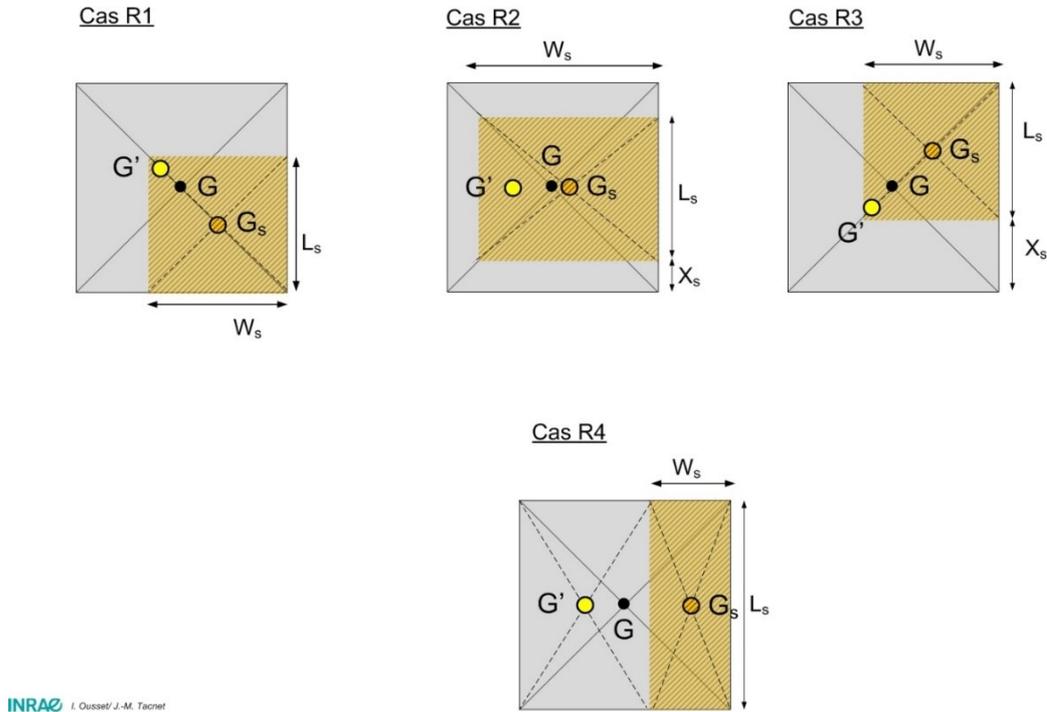


Figure 75 : Principe de détermination des contraintes en fondation en utilisant un modèle de type Navier : le sol est assimilé à une poutre soumise à une flexion composée

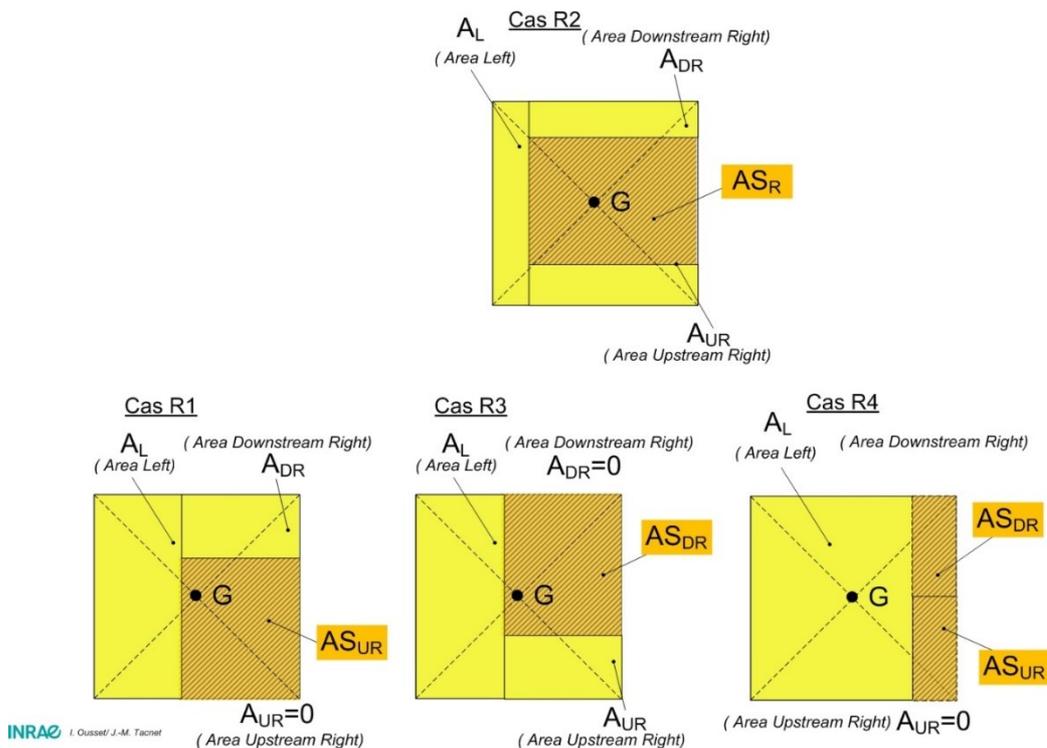
## 9.3. Configurations quelconques d'affouillement

### 9.3.1. Fondations de type radier



INRAE I. Ousset/ J.-M. Tacnet

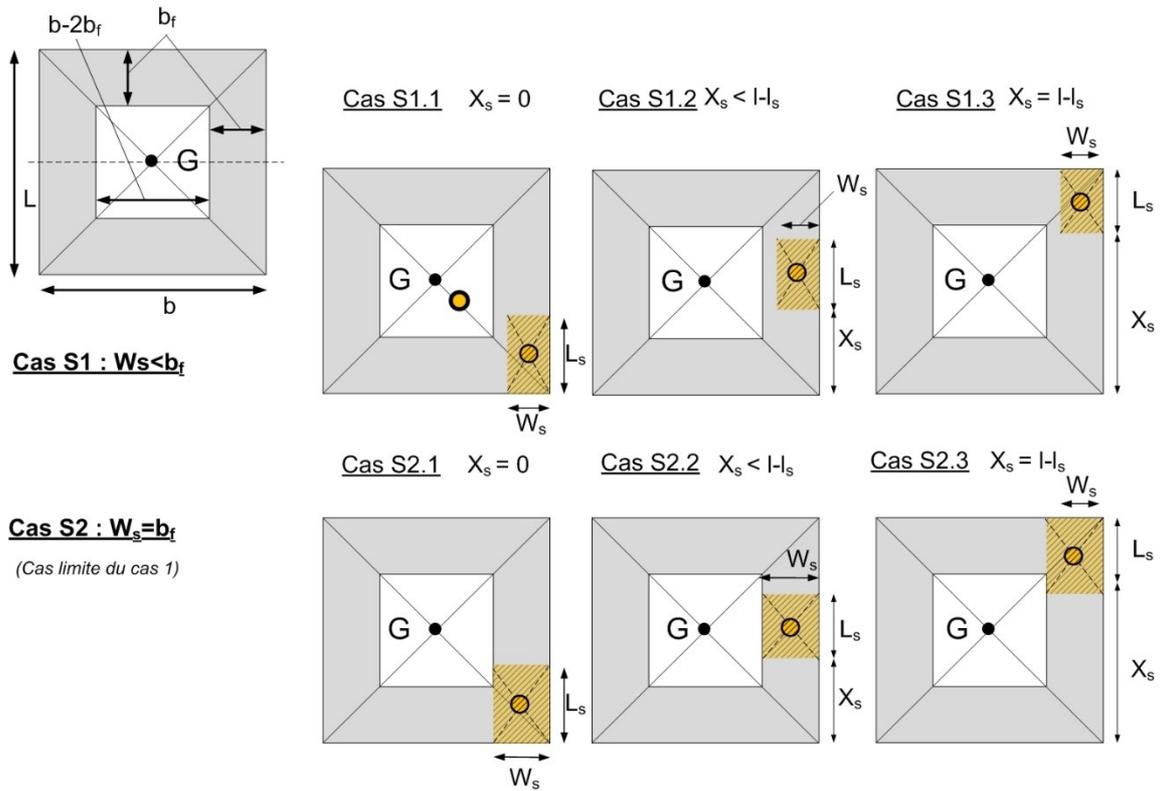
Figure 76 : Description des typologies d'affouillement de fondations de type semelle radier



INRAE I. Ousset/ J.-M. Tacnet

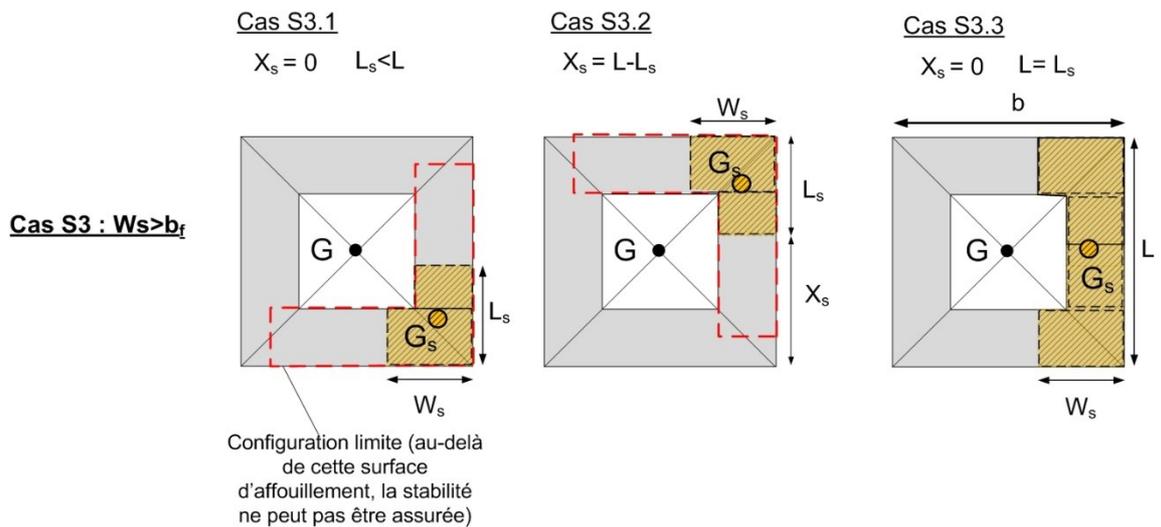
Figure 77 : codification des surfaces pour le calcul du centre de gravité d'une semelle de type radier

### 9.3.2. Configurations d'affouillement de fondations de type semelle filante



INRAE I. Ousset/ J.-M. Tacnet

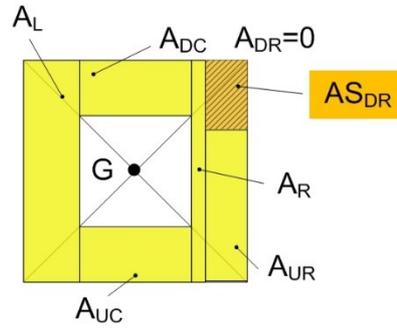
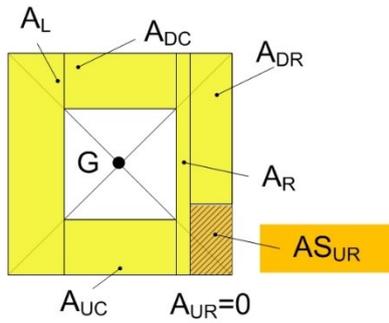
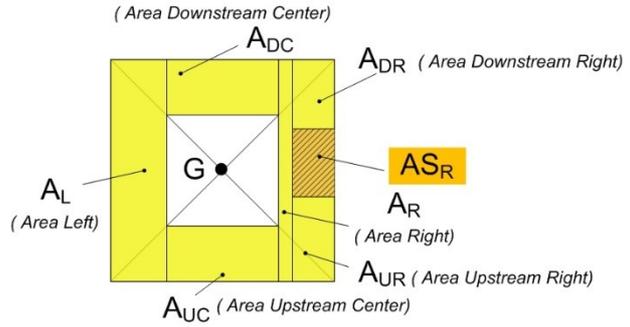
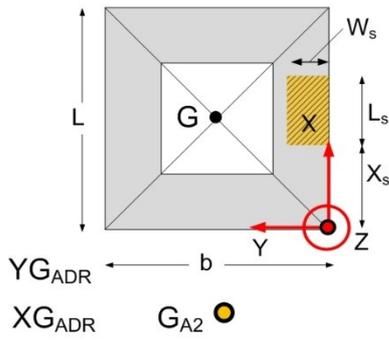
Figure 78 : Description des typologies d'affouillement de fondations de type semelle filante (largeur d'affouillement inférieure ou égale à la largeur de la fondation  $b_f$ )



INRAE I. Ousset/ J.-M. Tacnet

Figure 79 : Description des typologies d'affouillement de fondations de type semelle filante (largeur d'affouillement supérieure à la largeur de la fondation  $b_f$ )

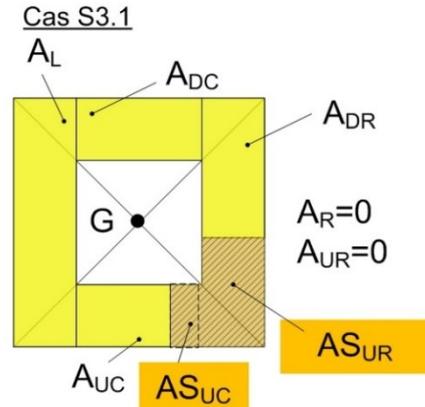
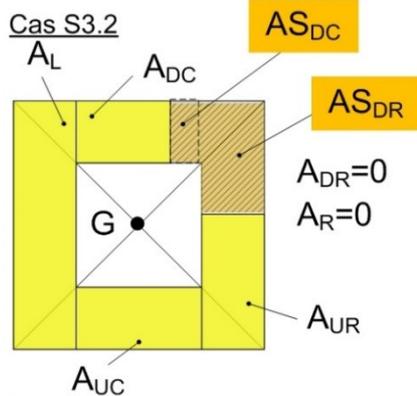
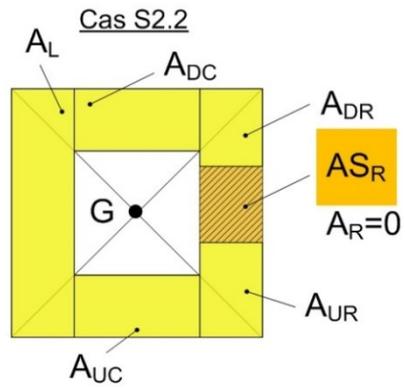
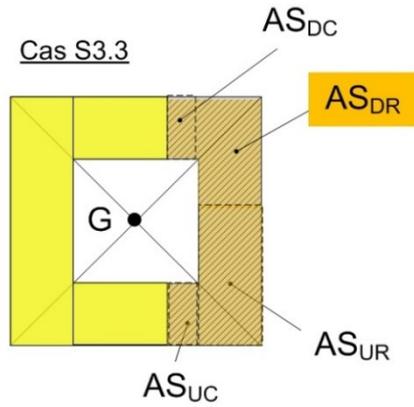
Cette configuration est la plus générale, elle est utilisée pour définir les surfaces de calcul du centre de gravité



INRAE I. Oussef / J.-M. Tacnet

Cette décomposition est utile si on calcule le centre de gravité à partir du centre de gravité de chacune des surfaces élémentaires. On peut aussi (option choisie) raisonner par différence de surface en utilisant la surface sur fond orange.

Figure 80 : Codification des surfaces pour le calcul



INRAE I. Oussef / J.-M. Tacnet

Cette décomposition est utile si on calcule le centre de gravité à partir du centre de gravité de chacune des surfaces élémentaires. On peut aussi (option choisie) raisonner par différence de surface en utilisant la surface sur fond orange.

Figure 81 : codification des surfaces pour le calcul du centre de gravité d'une semelle filante affouillée

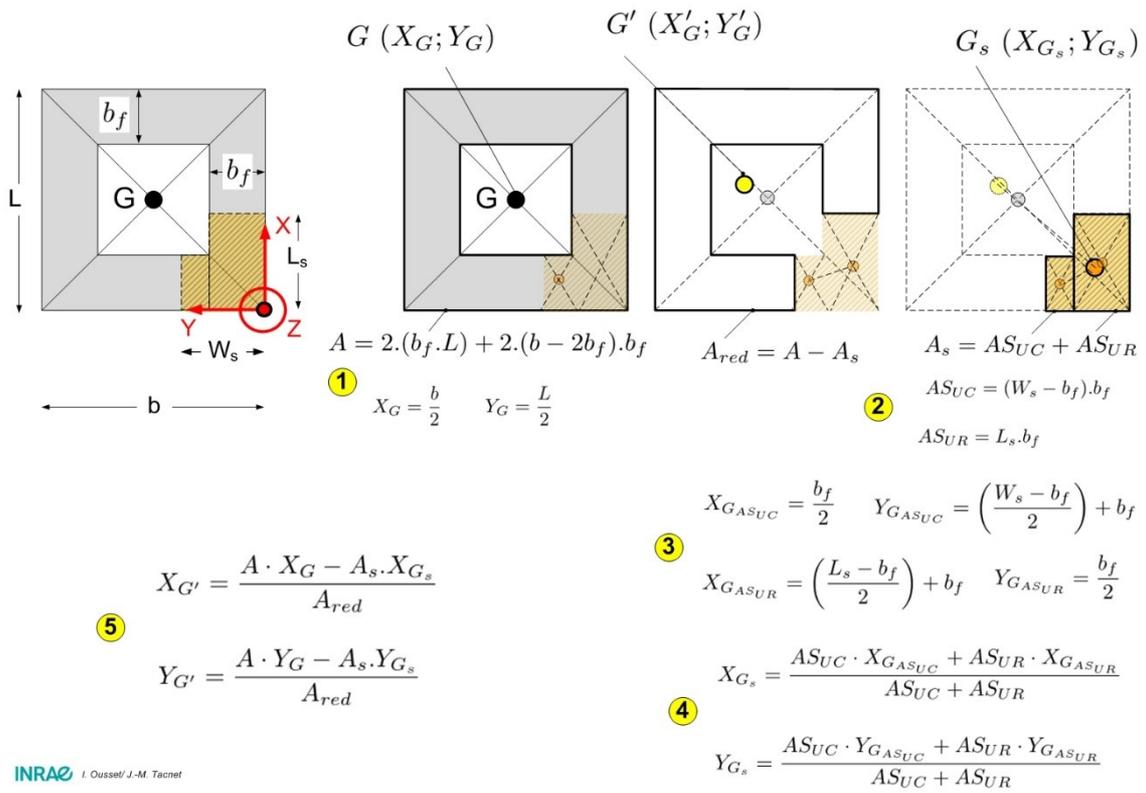


Figure 82 : Calcul du centre de gravité d'une fondation de type semelle filante affouillée dans un angle

## 9.4. Courbes d'endommagement caractéristiques

### 9.4.1. Analyse comparative des surfaces relatives d'affouillement entre radier et semelle filante

Données		Hypothèse radier		Hypothèse semelle filante									
ws/b (radier)	ws (m)	i: longueur de la semelle	b: largeur de la semelle	Surface de fondation affouillée (As)	Surface totale de fondation (A)	Ratio As/A (radier)	p.m. ws/(b+bf) (semelle filante)	bf: largeur de la semelle filante	ws/bf	Surface de fondation affouillée (As)	Surface totale de fondation (A)	Ratio As/A (semelle filante)	Ratio affouillement semelle filante/radier
0.01	0.1	10	10	0.7	70	1%	0.010	0.5	20%	0.8	17	4%	441%
0.02	0.2	10	10	1.4	70	2%	0.019	0.5	40%	1.5	17	9%	441%
0.03	0.3	7	10	2.1	70	3%	0.029	0.5	60%	2.3	17	13%	441%
0.04	0.4	7	10	2.8	70	4%	0.038	0.5	80%	3.0	17	18%	441%
0.05	0.5	7	10	3.5	70	5%	0.048	0.5	100%	3.8	17	22%	441%
0.1	1.00	7	10	7	70	10%	0.10	0.5	ws supérieur à bf	4.3	17	25%	250%
0.2	2.00	7	10	14	70	20%	0.19	0.5	ws supérieur à bf	5.3	17	31%	154%
0.3	3.00	7	10	21	70	30%	0.29	0.5	ws supérieur à bf	6.3	17	37%	123%
0.4	4.00	7	10	28	70	40%	0.38	0.5	ws supérieur à bf	7.3	17	43%	107%
0.5	5.00	7	10	35	70	50%	0.48	0.5	ws supérieur à bf	8.3	17	49%	97%
5.25	5.25	7	10				0.50	0.5	ws supérieur à bf	8.5	17	50%	
Hypothèse radier													
0.01	0.1	10	10	1	100	1%	0.010	0.5	20%	1.1	20	5%	525%
0.02	0.2	10	10	2	100	2%	0.019	0.5	40%	2.1	20	11%	525%
0.03	0.3	10	10	3	100	3%	0.029	0.5	60%	3.2	20	16%	525%
0.04	0.4	10	10	4	100	4%	0.038	0.5	80%	4.2	20	21%	525%
0.05	0.5	10	10	5	100	5%	0.048	0.5	100%	5.3	20	26%	525%
0.1	1.00	10	10	10	100	10%	0.10	0.5	ws supérieur à bf	5.8	20	29%	288%
0.2	2.00	10	10	20	100	20%	0.19	0.5	ws supérieur à bf	6.8	20	34%	169%
0.3	3.00	10	10	30	100	30%	0.29	0.5	ws supérieur à bf	7.8	20	39%	129%
0.4	4.00	10	10	40	100	40%	0.38	0.5	ws supérieur à bf	8.8	20	44%	109%
0.5	5.00	10	10	50	100	50%	0.48	0.5	ws supérieur à bf	9.8	20	49%	98%
5.25	5.25	10	10				0.50	0.5	ws supérieur à bf	10.0	20	50%	
Hypothèse semelle filante													
0.01	0.1	13	10	1.3	130	1%	0.010	0.5	20%	1.4	23	6%	587%
0.02	0.2	13	10	2.6	130	2%	0.019	0.5	40%	2.7	23	12%	587%
0.03	0.3	13	10	3.9	130	3%	0.029	0.5	60%	4.1	23	18%	587%
0.04	0.4	13	10	5.2	130	4%	0.038	0.5	80%	5.4	23	23%	587%
0.05	0.5	13	10	6.5	130	5%	0.048	0.5	100%	6.8	23	29%	587%
0.1	1.00	13	10	13	130	10%	0.10	0.5	ws supérieur à bf	7.3	23	32%	315%
0.2	2.00	13	10	26	130	20%	0.19	0.5	ws supérieur à bf	8.3	23	36%	179%
0.3	3.00	13	10	39	130	30%	0.29	0.5	ws supérieur à bf	9.3	23	40%	134%
0.4	4.00	13	10	52	130	40%	0.38	0.5	ws supérieur à bf	10.3	23	45%	111%
0.5	5.00	13	10	65	130	50%	0.48	0.5	ws supérieur à bf	11.3	23	49%	98%
5.25	5.25	13	10				0.50	0.5	ws supérieur à bf	11.5	23	50%	

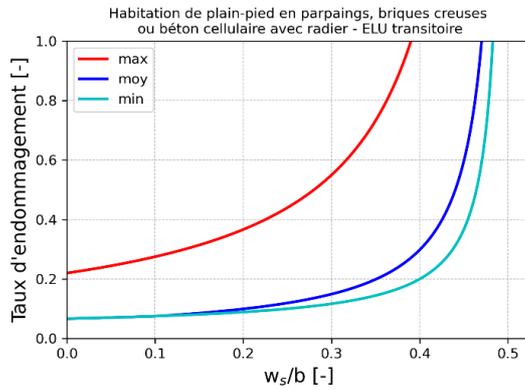
Tableau 17 : Comparaison des ratios entre surface affouillée et surface totale de fondation entre fondation de type radier et semelle filante en fonction de la longueur d'affouillement  $w_s$  (étude paramétrique en fonction de  $l$  valant 7, 10 puis 13m)

Variation de b (constant)													
ws/b (radier)	ws (m)	l : longueur de la semelle	b : largeur de la semelle	Hypothèse radier		Hypothèse semelle filante							
				Surface de fondation affouillée (As)	Surface totale de fondation (A)	Ratio As/A (radier)	p.m. ws/(b-hf) (semelle filante)	hf : largeur de la semelle filante	ws/bf	Surface de fondation affouillée (As)	Surface totale de fondation (A)	Ratio As/A (semelle filante)	Ratio affouillement semelle filante/radier
0.01	0.1	10	7	1	70	1%	0.013	0.5	20%	1.1	17	6%	432%
0.03	0.2	10	7	2	70	3%	0.027	0.5	40%	2.1	17	12%	432%
0.04	0.3	10	7	3	70	4%	0.040	0.5	60%	3.2	17	19%	432%
0.06	0.4	10	7	4	70	6%	0.053	0.5	80%	4.2	17	25%	432%
0.07	0.5	10	7	5	70	7%	0.067	0.5	100%	5.3	17	31%	432%
0.1	0.70	10	7	7	70	10%	0.09	0.5	ws supérieur à bf	5.5	17	32%	321%
0.2	1.40	10	7	14	70	20%	0.19	0.5	ws supérieur à bf	6.2	17	36%	181%
0.3	2.10	10	7	21	70	30%	0.28	0.5	ws supérieur à bf	6.9	17	40%	134%
0.4	2.80	10	7	28	70	40%	0.37	0.5	ws supérieur à bf	7.6	17	44%	111%
0.5	3.50	10	7	35	70	50%	0.47	0.5	ws supérieur à bf	8.3	17	49%	97%
3.75		10	7				0.50	0.5	ws supérieur à bf	8.5	17	50%	
Hypothèse radier													
0.01	0.1	10	10	1	100	1%	0.010	0.5	20%	1.1	20	5%	525%
0.02	0.2	10	10	2	100	2%	0.019	0.5	40%	2.1	20	11%	525%
0.03	0.3	10	10	3	100	3%	0.029	0.5	60%	3.2	20	16%	525%
0.04	0.4	10	10	4	100	4%	0.038	0.5	80%	4.2	20	21%	525%
0.05	0.5	10	10	5	100	5%	0.048	0.5	100%	5.3	20	26%	525%
0.1	1.00	10	10	10	100	10%	0.10	0.5	ws supérieur à bf	5.8	20	29%	288%
0.2	2.00	10	10	20	100	20%	0.19	0.5	ws supérieur à bf	6.8	20	34%	169%
0.3	3.00	10	10	30	100	30%	0.29	0.5	ws supérieur à bf	7.8	20	39%	129%
0.4	4.00	10	10	40	100	40%	0.38	0.5	ws supérieur à bf	8.8	20	44%	109%
0.5	5.00	10	10	50	100	50%	0.48	0.5	ws supérieur à bf	9.8	20	49%	98%
5.25		10	10				0.50	0.5	ws supérieur à bf	10.0	20	50%	
Hypothèse radier													
Hypothèse semelle filante													
0.01	0.1	10	13	1	130	1%	0.007	0.5	20%	1.1	23	5%	593%
0.02	0.2	10	13	2	130	2%	0.015	0.5	40%	2.1	23	9%	593%
0.02	0.3	10	13	3	130	2%	0.022	0.5	60%	3.2	23	14%	593%
0.03	0.4	10	13	4	130	3%	0.030	0.5	80%	4.2	23	18%	593%
0.04	0.5	10	13	5	130	4%	0.037	0.5	100%	5.3	23	23%	593%
0.1	1.30	10	13	13	130	10%	0.10	0.5	ws supérieur à bf	1.2	23	5%	52%
0.2	2.60	10	13	26	130	20%	0.19	0.5	ws supérieur à bf	2.9	23	13%	63%
0.3	3.90	10	13	39	130	30%	0.29	0.5	ws supérieur à bf	5.1	23	22%	73%
0.4	5.20	10	13	52	130	40%	0.39	0.5	ws supérieur à bf	7.7	23	34%	84%
0.5	6.50	10	13	65	130	50%	0.48	0.5	ws supérieur à bf	10.8	23	47%	94%
6.75		10	13				0.50	0.5	ws supérieur à bf	11.5	23	50%	

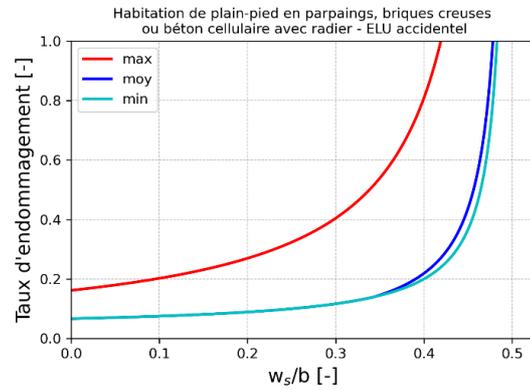
Tableau 18 : Comparaison des ratios entre surface affouillée et surface totale de fondation entre fondation de type radier et semelle filante en fonction de la largeur d'affouillement  $w_s$  (étude paramétrique en fonction de b valant 7, 10 puis 13m)

## 9.4.2. Habitation de plain-pied avec radier

- **En parpaings, briques creuses ou béton cellulaire**



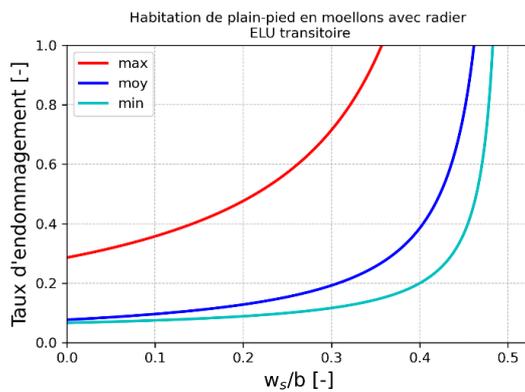
(a)



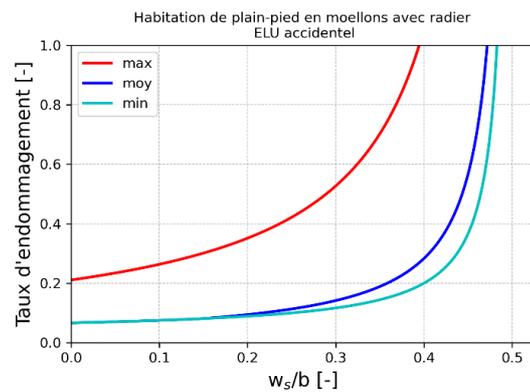
(b)

Figure 83 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire avec radier à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- **En moellons**



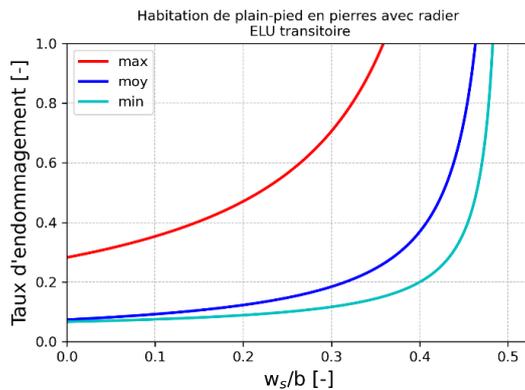
(a)



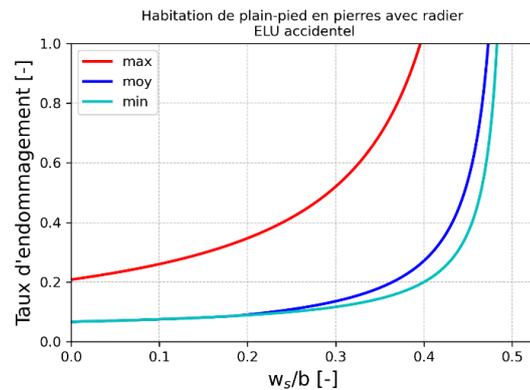
(b)

Figure 84 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en moellons avec radier à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- **En pierres**



(a)



(b)

Figure 85 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en pierres avec radier à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- Tous matériaux confondus

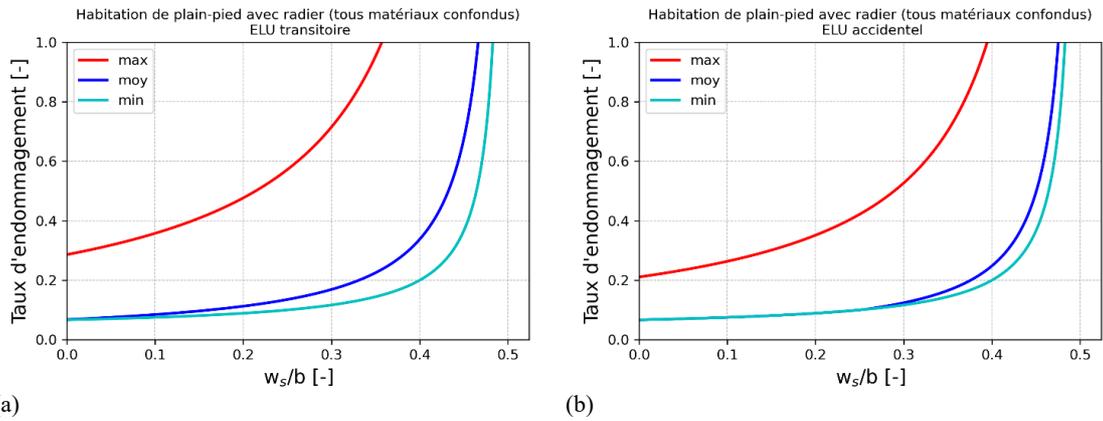


Figure 86 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied avec radier, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

### 9.4.3. Habitation de plain-pied avec semelle filante

- En parpaings, briques creuses ou béton cellulaire

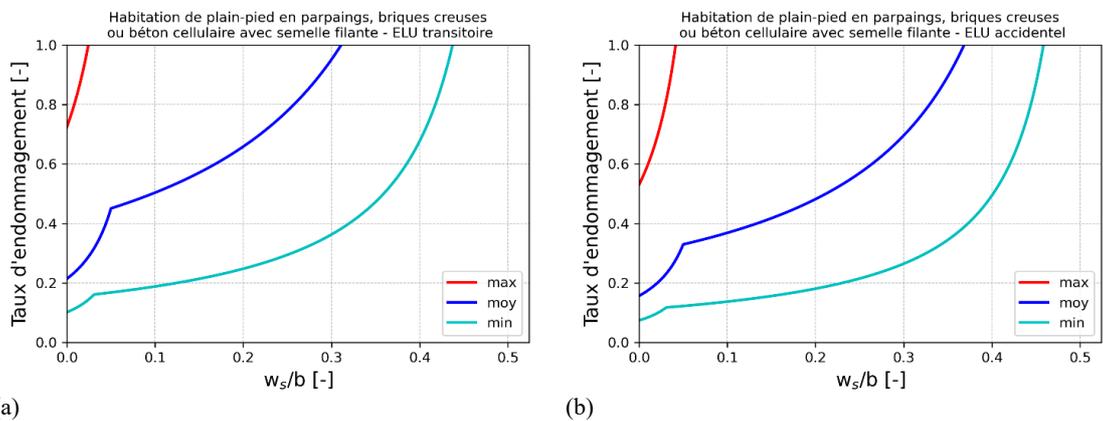


Figure 87 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire avec semelle filante à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- En moellons

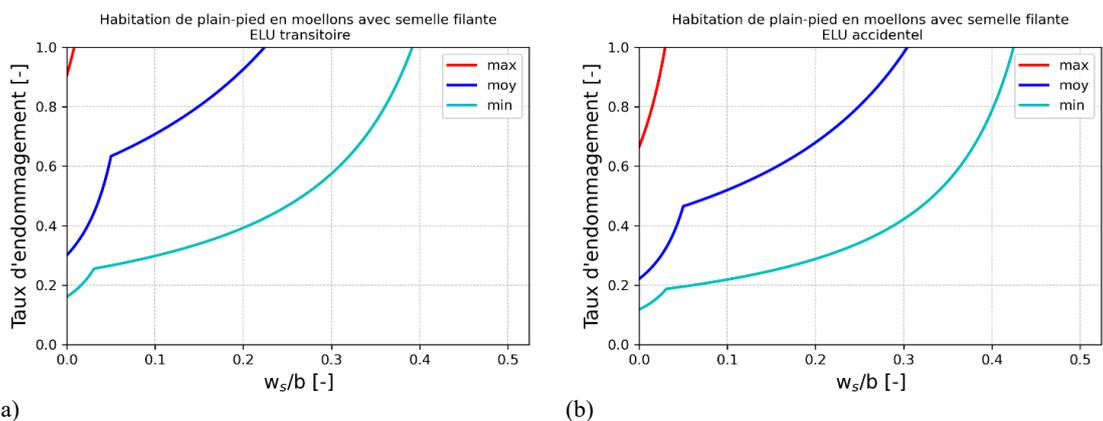


Figure 88 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en moellons avec semelle filante à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- En pierres

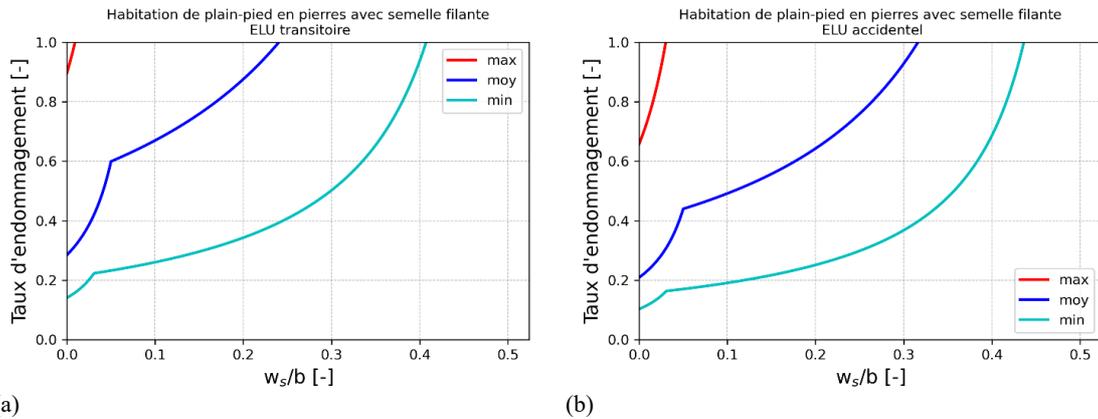


Figure 89 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied en pierres avec semelle filante à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- Tous matériaux confondus

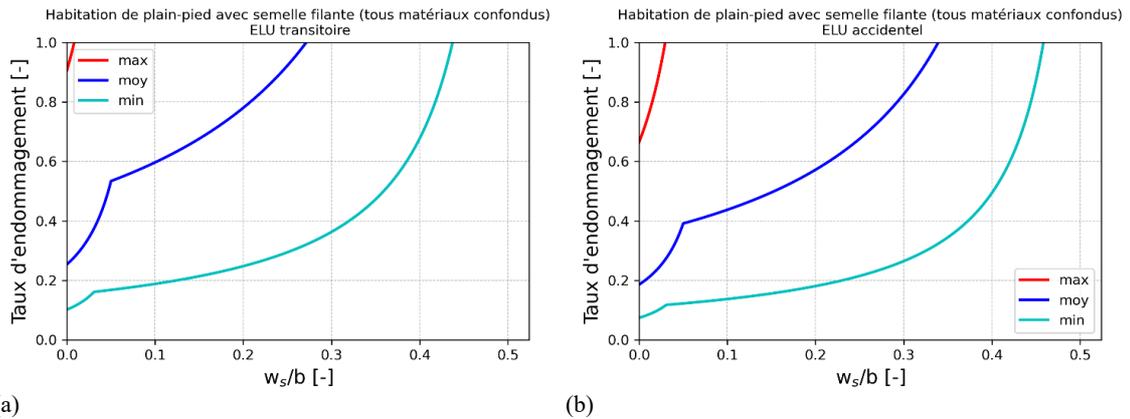


Figure 90 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation de plain-pied avec semelle filante, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

## 9.4.4. Habitation sur sous-sol sans étage

- En parpaings, briques creuses ou béton cellulaire

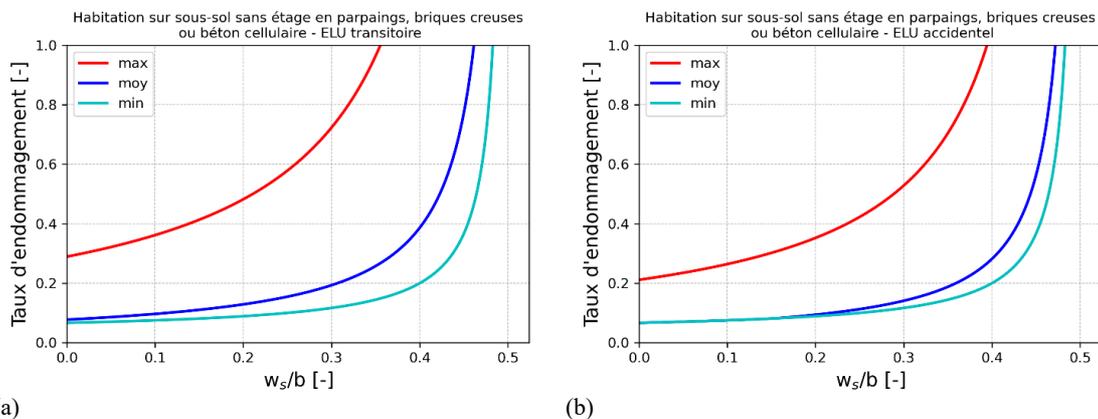
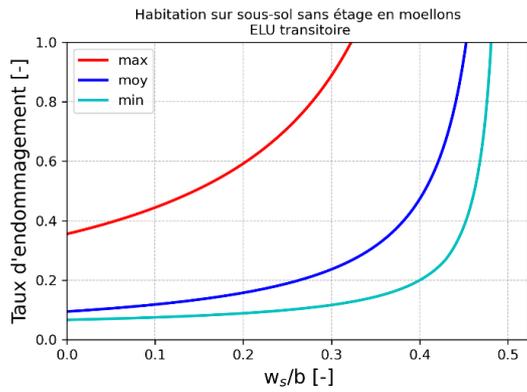
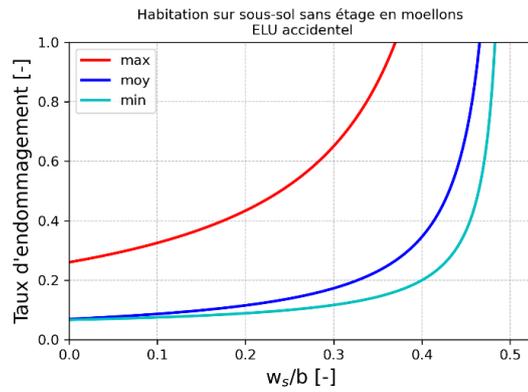


Figure 91 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol sans étage en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- En moellons



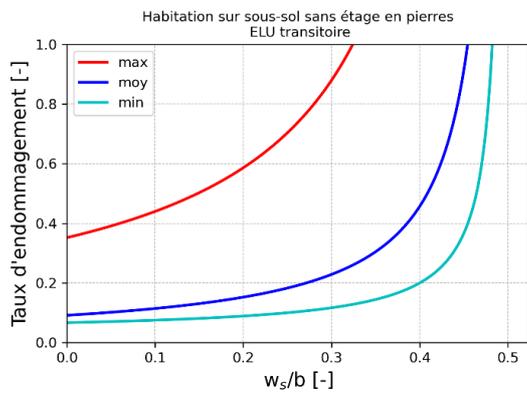
(a)



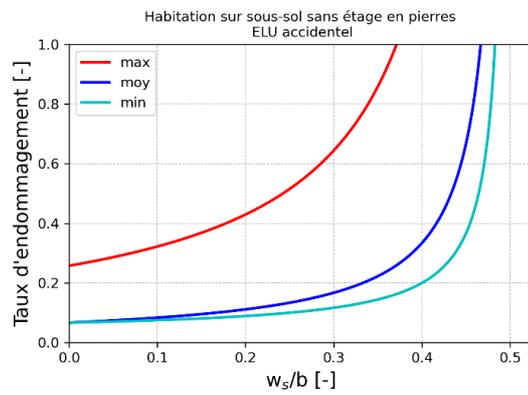
(b)

Figure 92 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol sans étage en moellons à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- En pierres



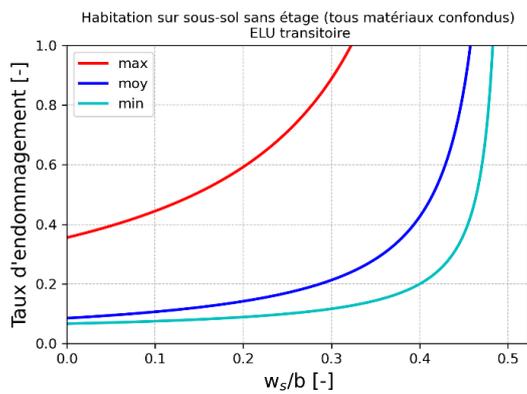
(a)



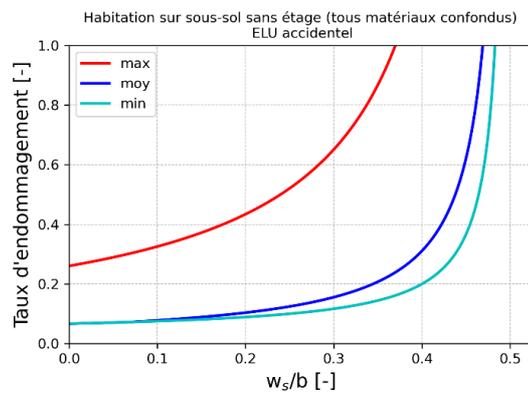
(b)

Figure 93 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol sans étage en pierres à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- Tous matériaux confondus



(a)



(b)

Figure 94 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol sans étage, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

## 9.4.5. Habitation sur vide sanitaire avec un étage

- En parpaings, briques creuses ou béton cellulaire

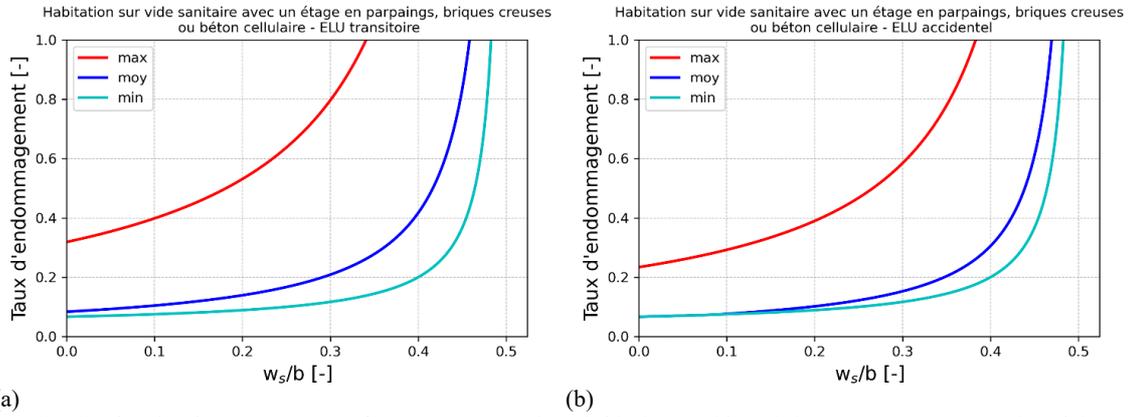


Figure 95 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- En moellons

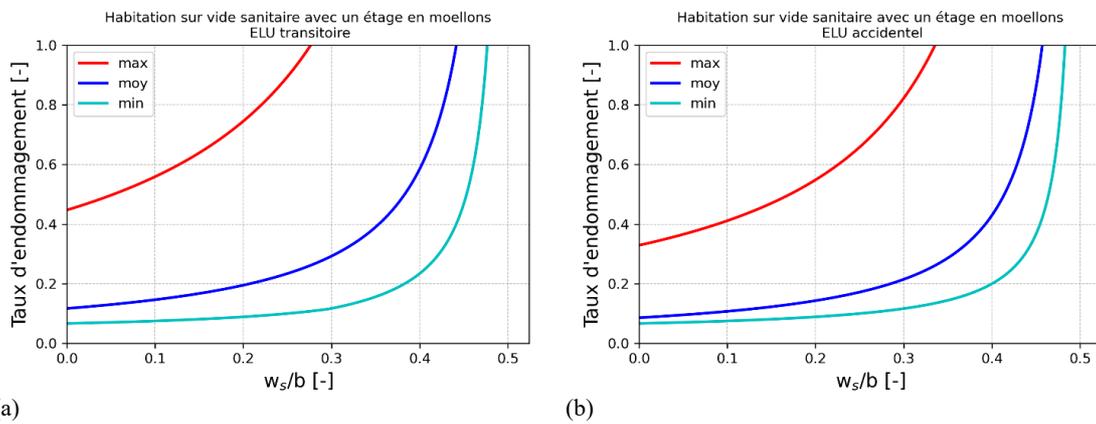


Figure 96 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage en moellons à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- En pierres

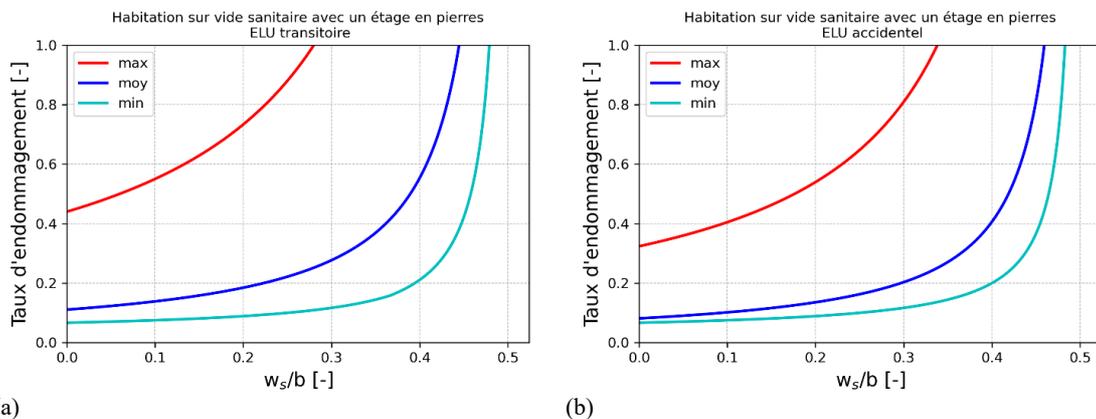


Figure 97 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage en pierres à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- Tous matériaux confondus

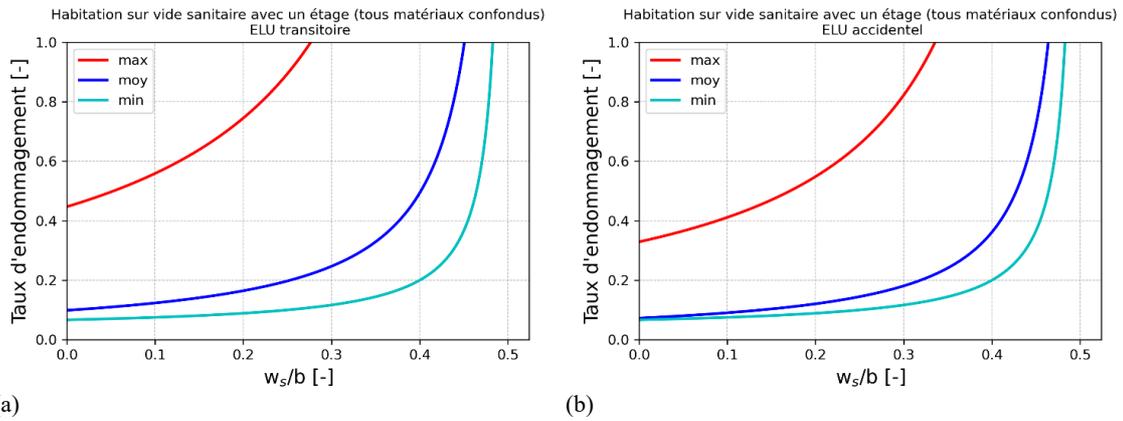


Figure 98 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

## 9.4.6. Habitation sur sous-sol avec un étage

- En parpaings, briques creuses ou béton cellulaire

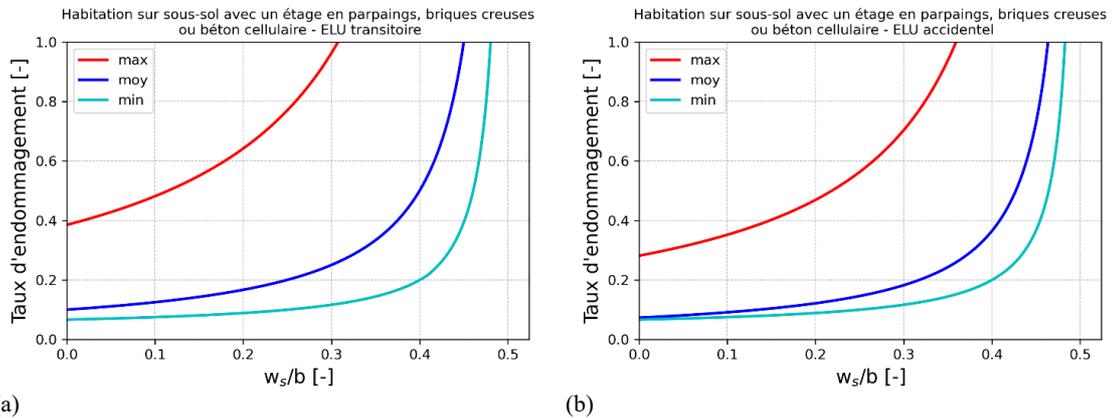


Figure 99 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol avec un étage en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- En moellons

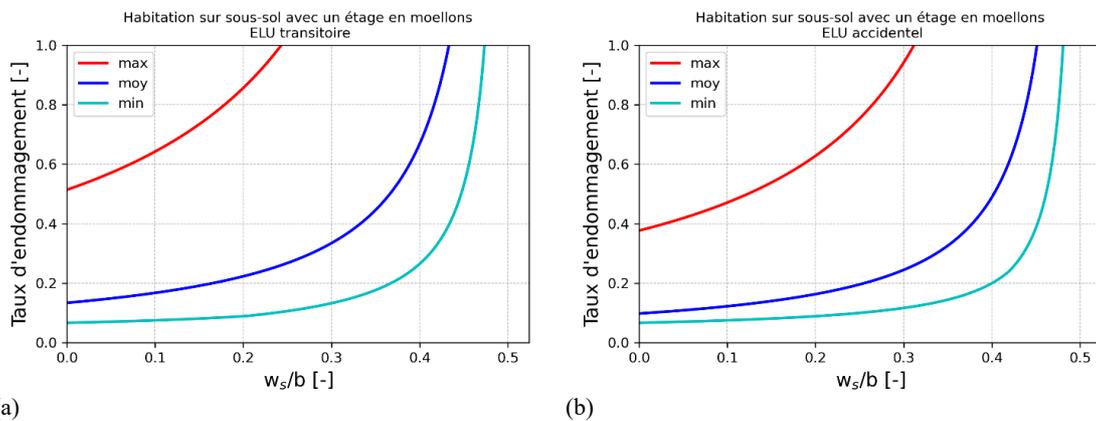
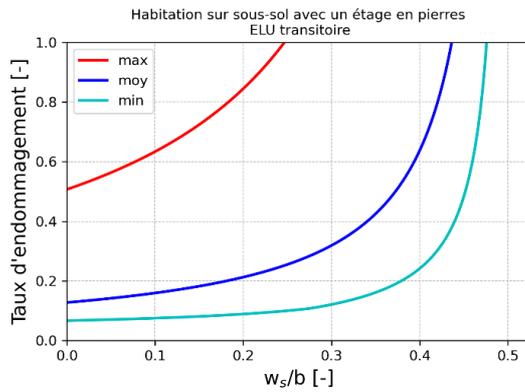
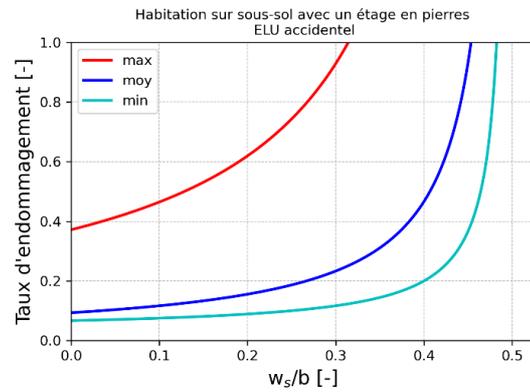


Figure 100 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol avec un étage en moellons à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- En pierres



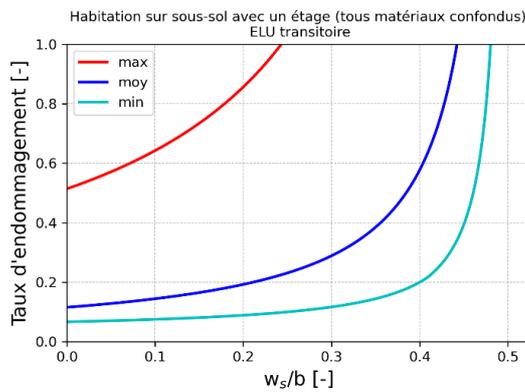
(a)



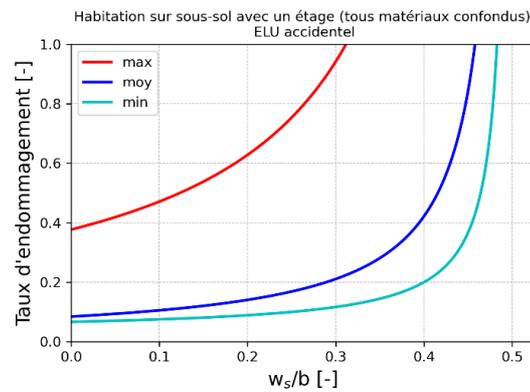
(b)

Figure 101 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol avec un étage en pierres à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- Tous matériaux confondus



(a)



(b)

Figure 102 : Courbes d'endommagement enveloppes et moyenne d'une habitation sur sous-sol avec un étage, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

## 9.4.7. Comparaison entre les différents types d'habitation

- En parpaings, briques creuses ou béton cellulaire

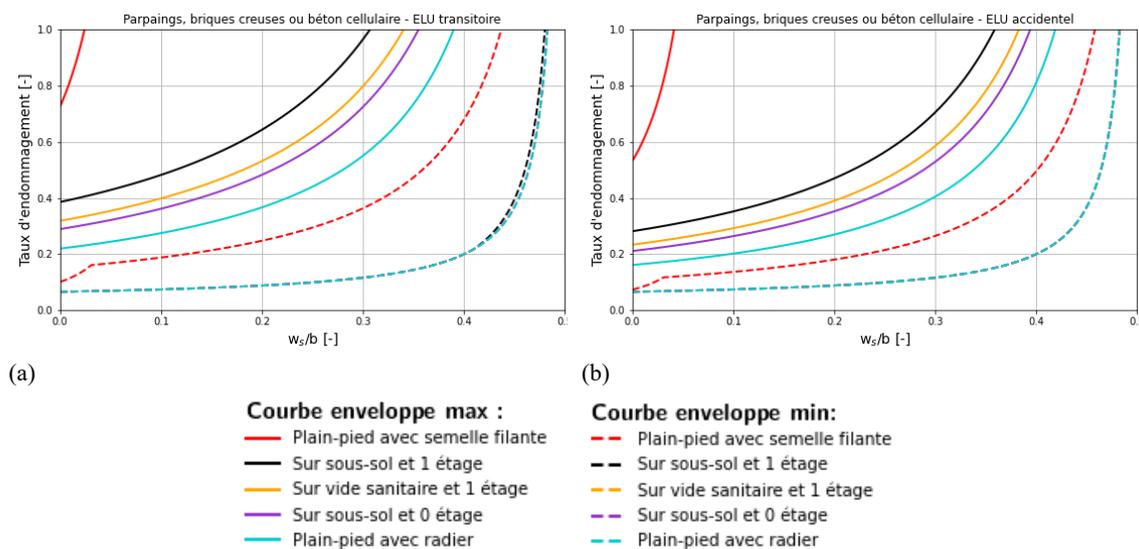


Figure 103 : Courbes d'endommagement enveloppes pour les différents types d'habitation étudiés, en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

- En moellons

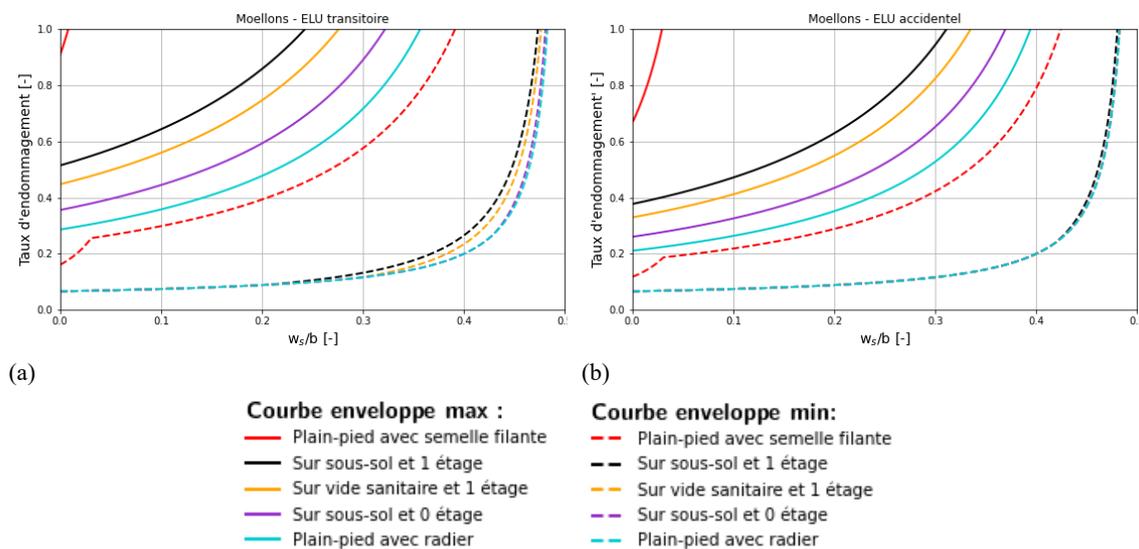


Figure 104 : Courbes d'endommagement enveloppes pour les différents types d'habitation étudiés, en moellons, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

• En pierres

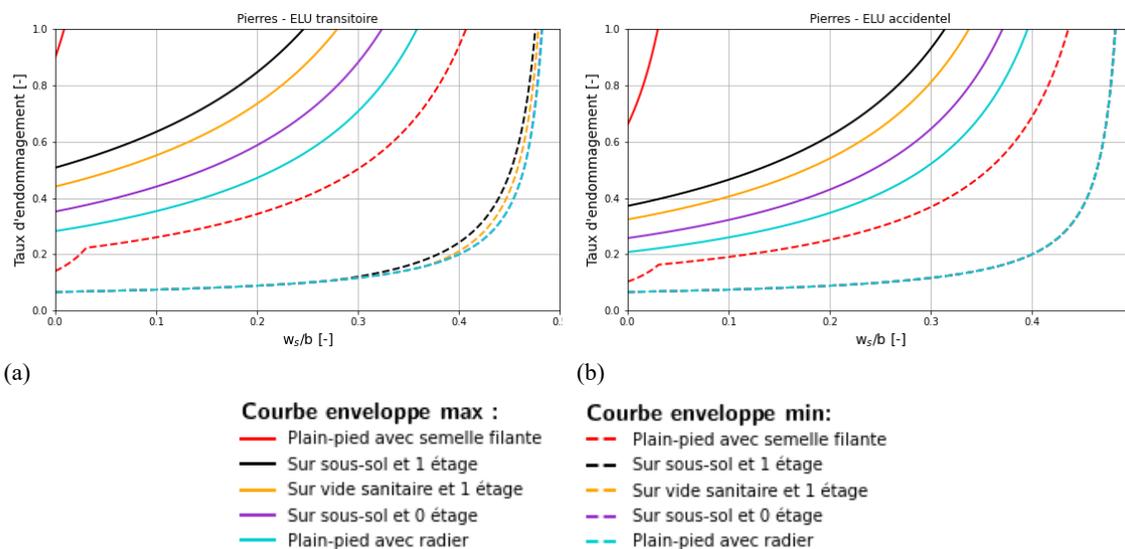


Figure 105 : Courbes d'endommagement enveloppes pour les différents types d'habitation étudiés, en pierres, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

• Tous matériaux confondus

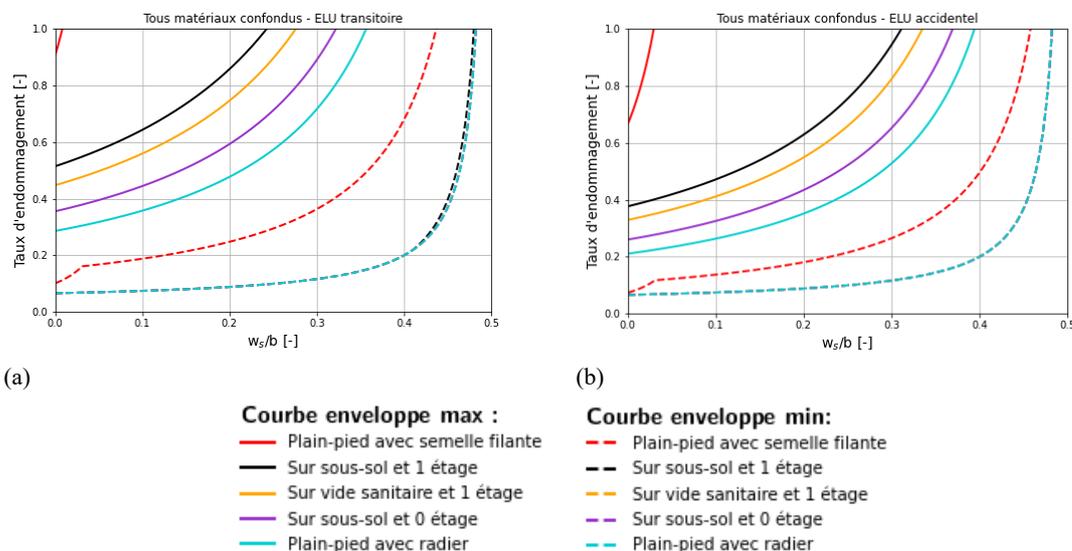


Figure 106 : Courbes d'endommagement enveloppes pour les différents types d'habitation étudiés, tous matériaux confondus, à l'ELU (a) transitoire et (b) accidentel

## 9.5. Courbes de fragilité caractéristiques

### 9.5.1. Habitation de plain-pied avec radier

#### 2.1.2. Pour différentes catégories de sol

- En parpaings, briques creuses ou béton cellulaire

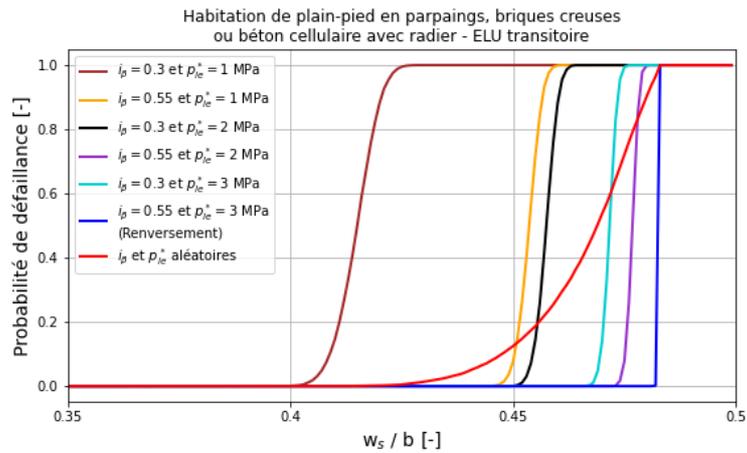


Figure 107 : Influence des paramètres du sol ( $i_\beta$  et  $p_{ic}^*$ ) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier et murs en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire, à l'ELU transitoire

- En moellons

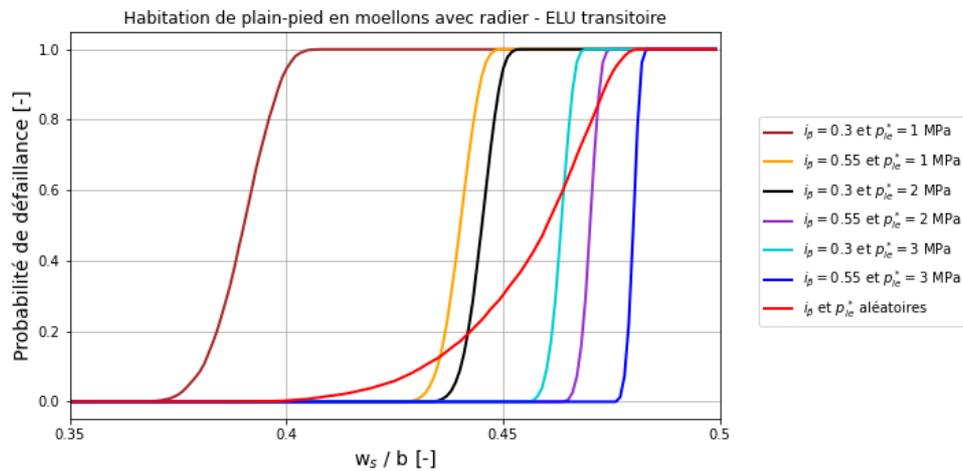


Figure 108 : Influence des paramètres du sol ( $i_\beta$  et  $p_{ic}^*$ ) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier et murs en moellons, à l'ELU transitoire

- En pierres

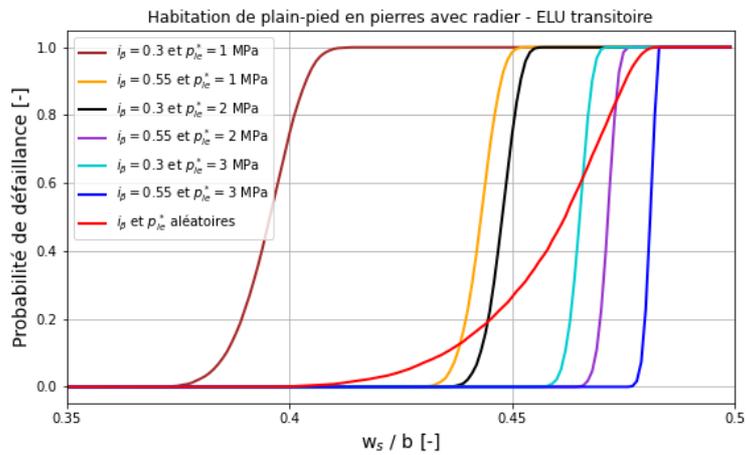


Figure 109 : Influence des paramètres du sol ( $i_\beta$  et  $p_{le}^*$ ) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier et murs en pierres, à l'ELU transitoire

- Tous matériaux confondus

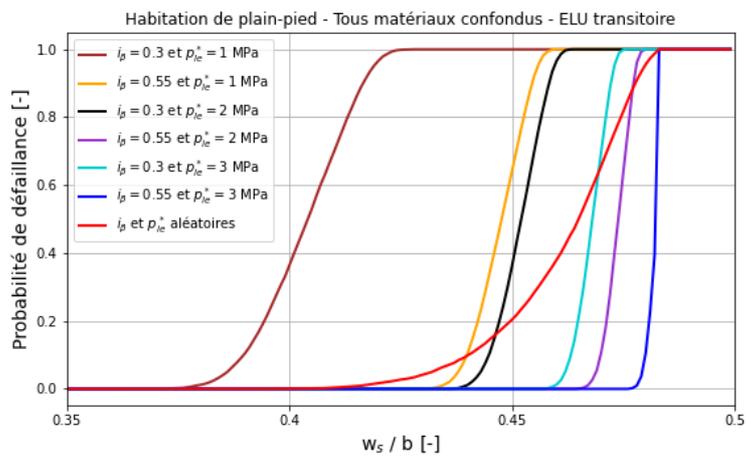


Figure 110 : Influence des paramètres du sol ( $i_\beta$  et  $p_{le}^*$ ) sur la courbe de fragilité globale (tous matériaux confondus) d'une habitation de plain-pied avec radier, à l'ELU transitoire

### 2.1.2. Pour $i_\beta$ et $p_{le}^*$ aléatoires

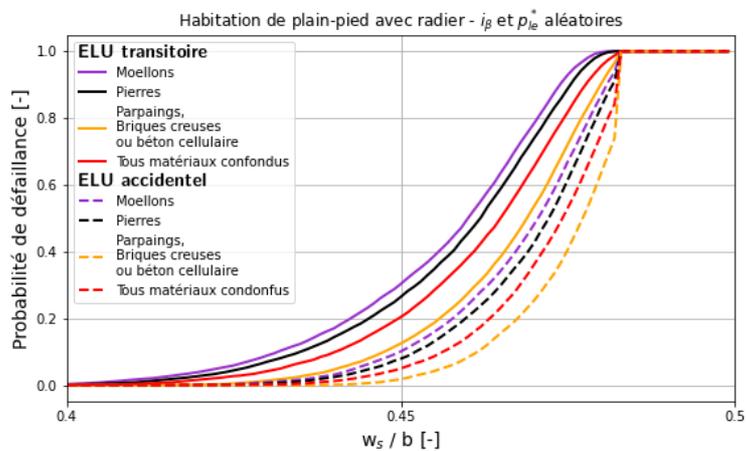


Figure 111 : Influence des états limites ultimes (ELU) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec radier, pour  $i_\beta$  et  $p_{le}^*$  aléatoires et différents types de murs

## 9.5.2. Habitation de plain-pied avec semelle filante

- En parpaings, briques creuses ou béton cellulaire

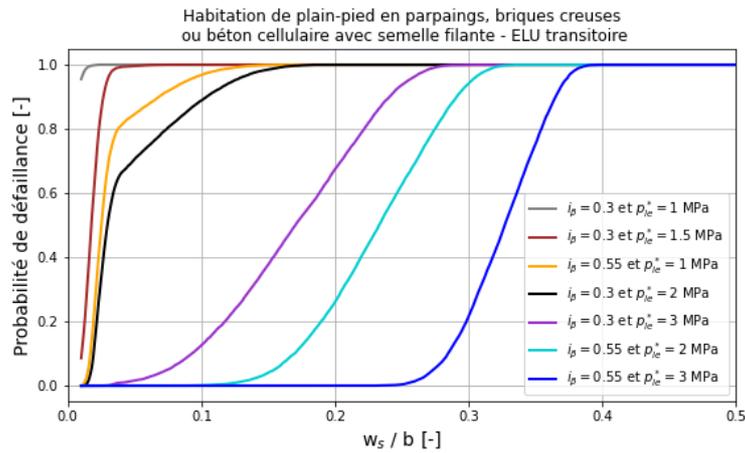


Figure 112 : Courbes de fragilité à l'ELU transitoire d'une habitation de plain-pied en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol

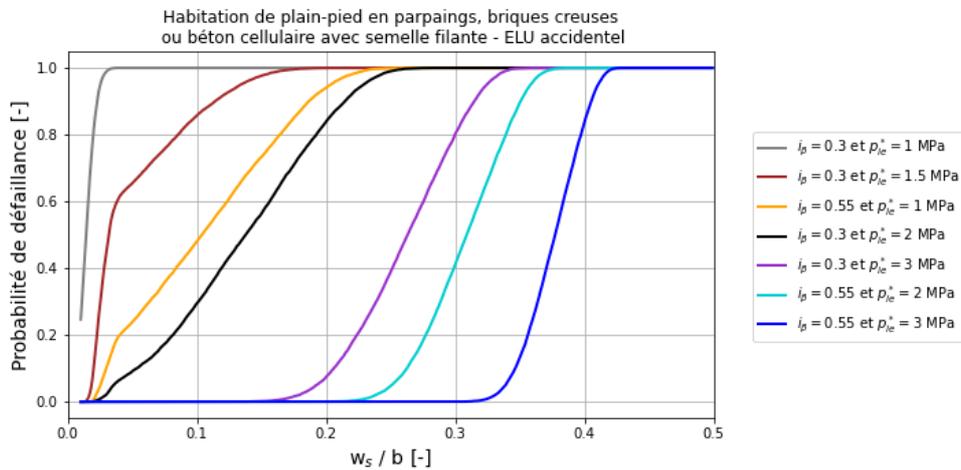


Figure 113 : Courbes de fragilité à l'ELU accidentel d'une habitation de plain-pied en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol

- En moellons

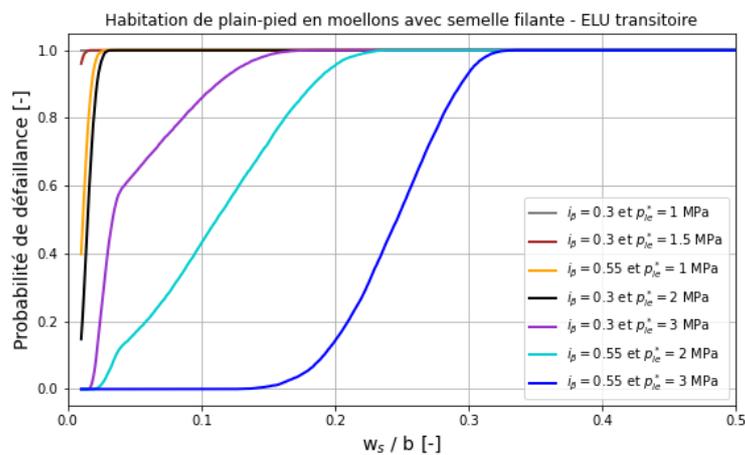


Figure 114 : Courbes de fragilité à l'ELU transitoire d'une habitation de plain-pied en moellons avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol

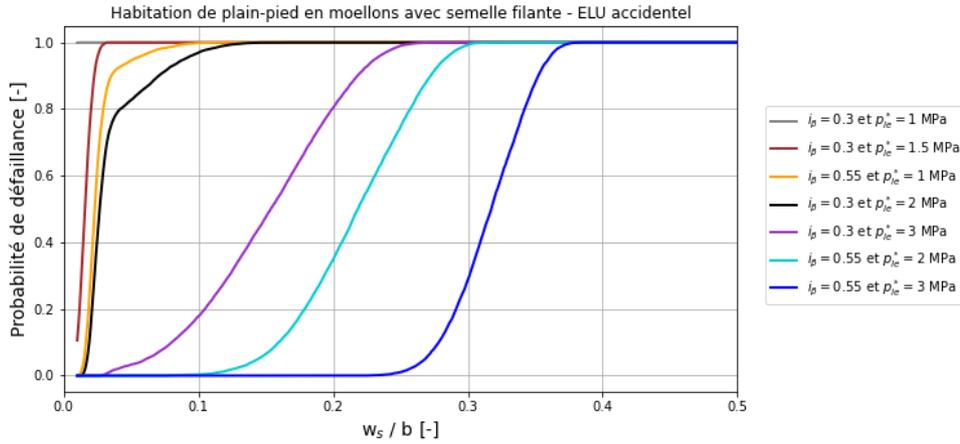


Figure 115 : Courbes de fragilité à l'ELU accidentel d'une habitation de plain-pied en moellons avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol

- En pierres

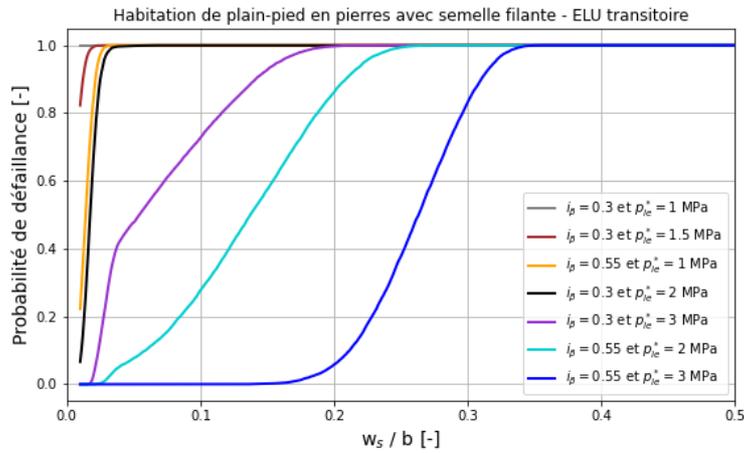


Figure 116 : Courbes de fragilité à l'ELU transitoire d'une habitation de plain-pied en pierres avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol

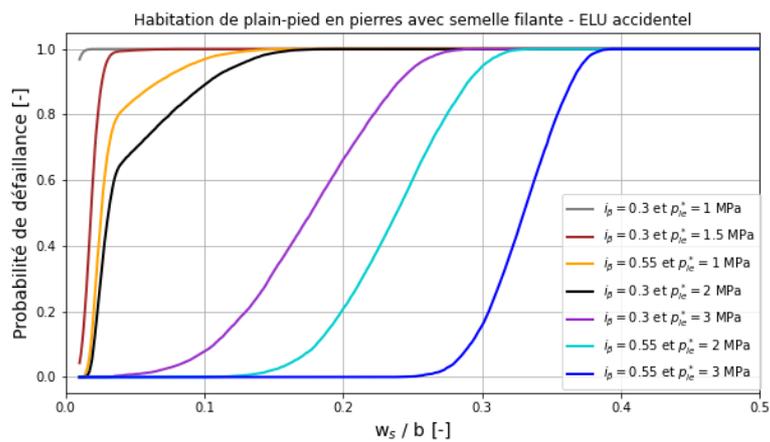


Figure 117 : Courbes de fragilité à l'ELU accidentel d'une habitation de plain-pied en pierres avec semelle filante, pour différentes caractéristiques de sol

- Tous matériaux confondus

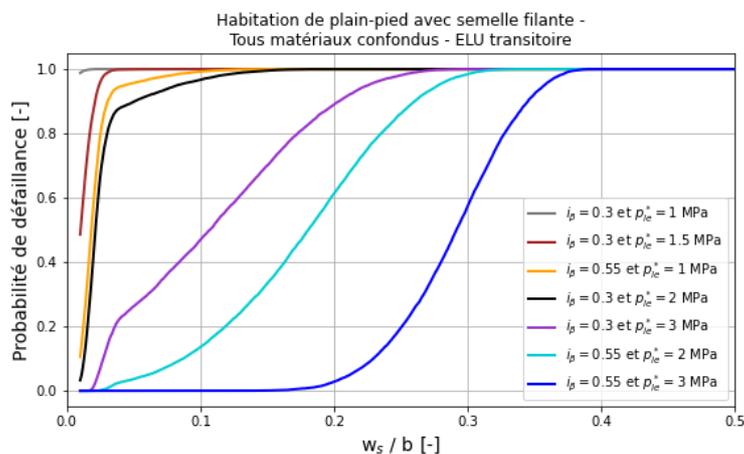


Figure 118 : Courbes de fragilité à l'ELU transitoire d'une habitation de plain-pied avec semelle filante, tous matériaux confondus, pour différentes caractéristiques de sol

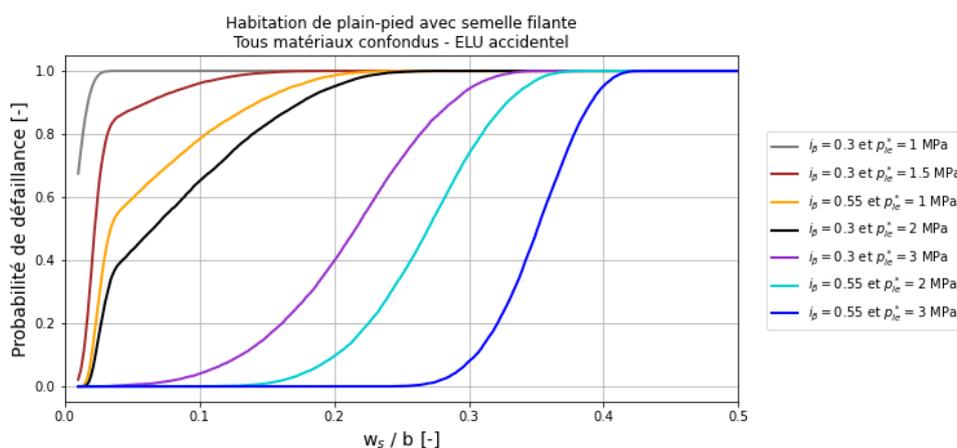


Figure 119 : Courbes de fragilité à l'ELU accidentel d'une habitation de plain-pied avec semelle filante, tous matériaux confondus, pour différentes caractéristiques de sol

- Comparaison

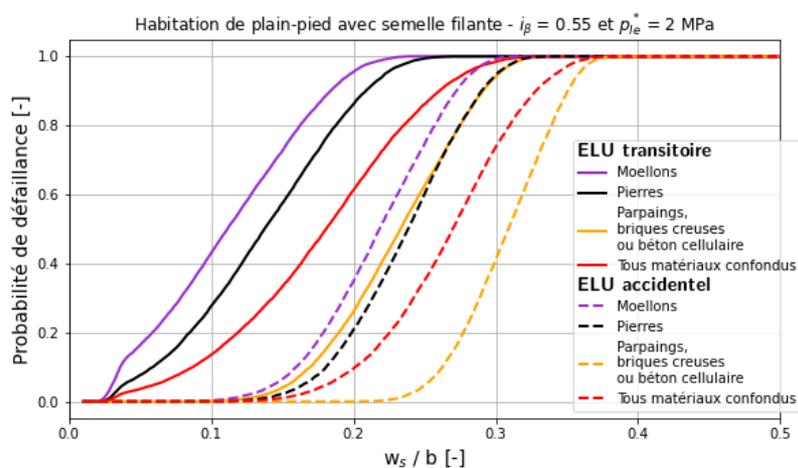


Figure 120 : Influence du type de murs et des états limites ultimes (ELU) sur la courbe de fragilité d'une habitation de plain-pied avec semelle filante, pour  $i_{\beta} = 0.55$  et  $\rho_{ce}^* = 2$  MPa

### 9.5.3.

## Habitation sur sous-sol sans étage

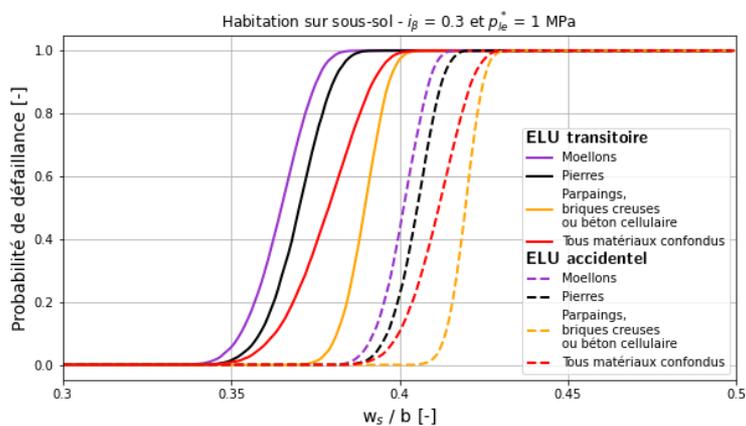


Figure 121 : Courbes de fragilité d'une habitation sur sous-sol sans étage, pour  $i_\beta = 0.3$  et  $p_{te}^* = 1$  MPa

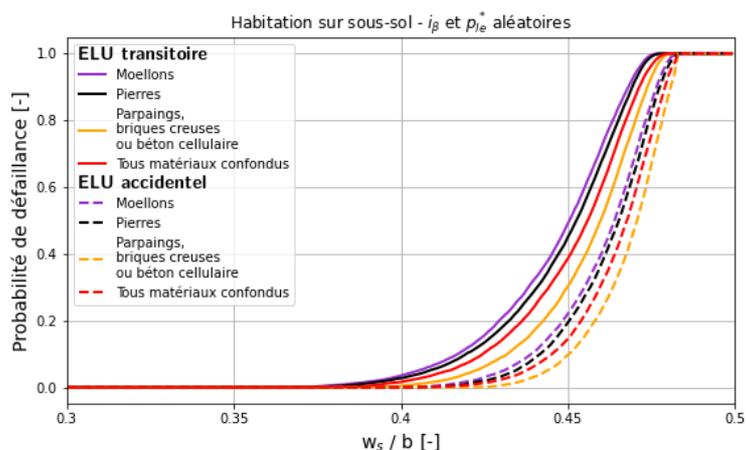


Figure 122 : Courbes de fragilité d'une habitation sur sous-sol sans étage, pour  $i_\beta$  et  $p_{te}^*$  aléatoires

### 9.5.4.

## Habitation sur vide sanitaire avec un étage

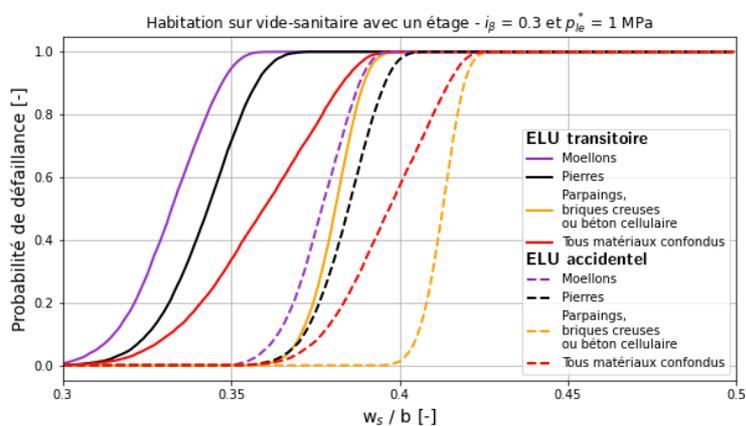


Figure 123 : Courbes de fragilité d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage, pour  $i_\beta = 0.3$  et  $p_{te}^* = 1$  MPa

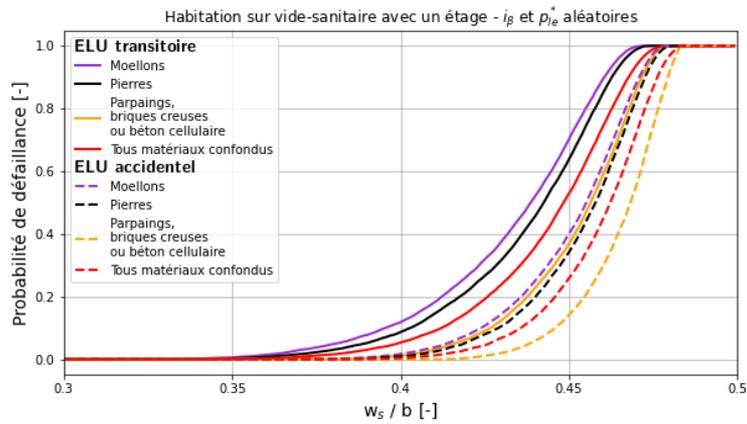


Figure 124 : Courbes de fragilité d'une habitation sur vide sanitaire avec un étage, pour  $i_{\beta}$  et  $p_{le}^*$  aléatoires

### 9.5.5. Habitation sur sous-sol et avec un étage

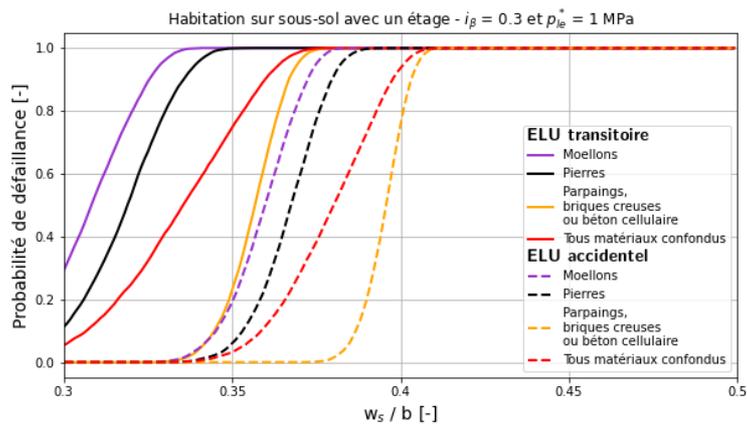


Figure 125 : Courbes de fragilité d'une habitation sur sous-sol avec un étage, pour  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa

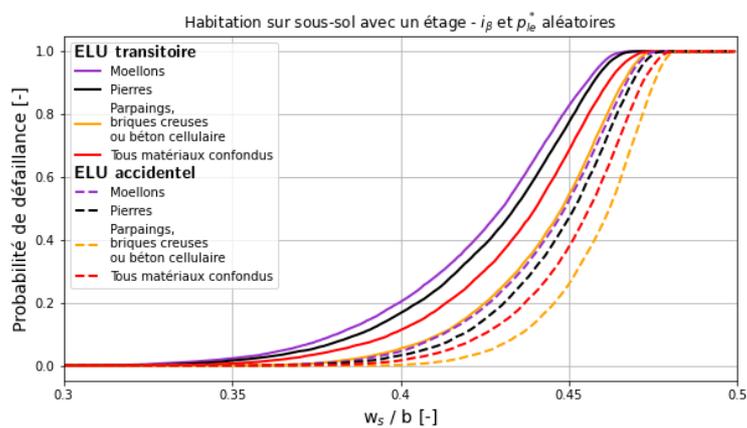


Figure 126 : Courbes de fragilité d'une habitation sur sous-sol avec un étage, pour  $i_{\beta}$  et  $p_{le}^*$  aléatoires

## 9.5.6.

## Comparaison entre types de bâti

- En moellons

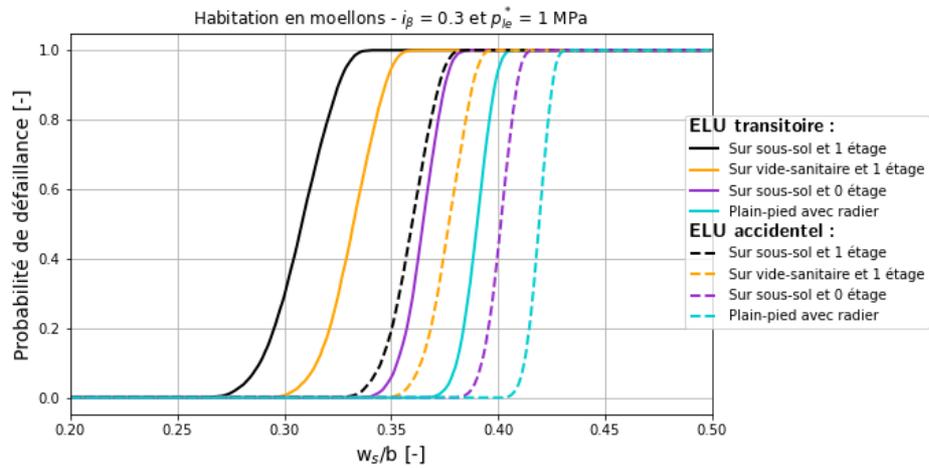


Figure 127 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti (sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage) en moellons, pour  $i_\beta = 0.3$  et  $p_{te}^* = 1$  MPa

- En pierres

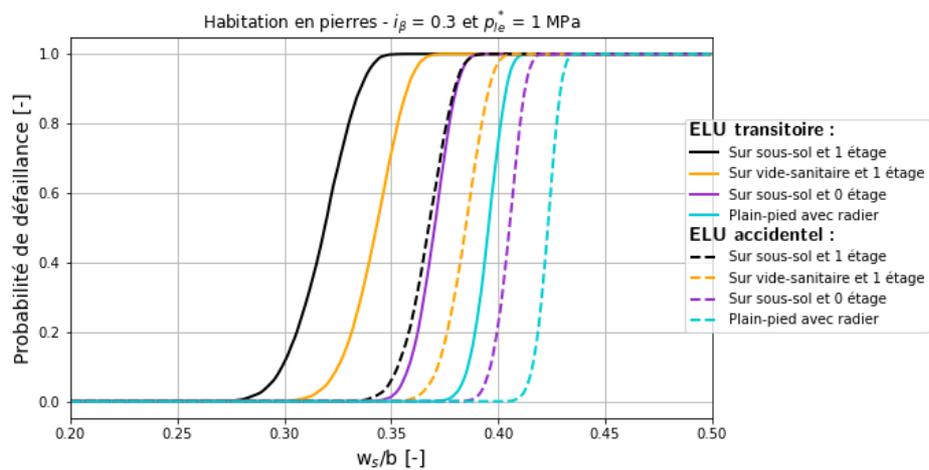


Figure 128 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti (sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage) en pierres, pour  $i_\beta = 0.3$  et  $p_{te}^* = 1$  MPa

- En parpaings, briques creuses ou béton cellulaire

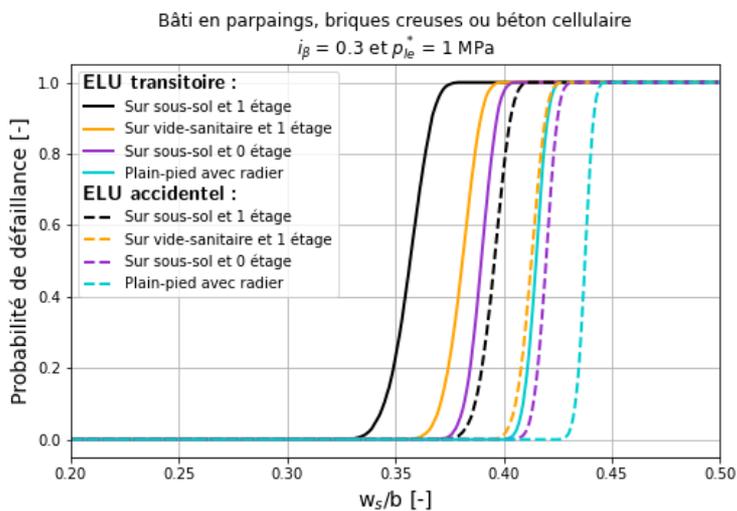


Figure 129 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti (sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage) en parpaings, briques creuses ou béton cellulaire avec radier, pour  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa

- Tous matériaux confondus

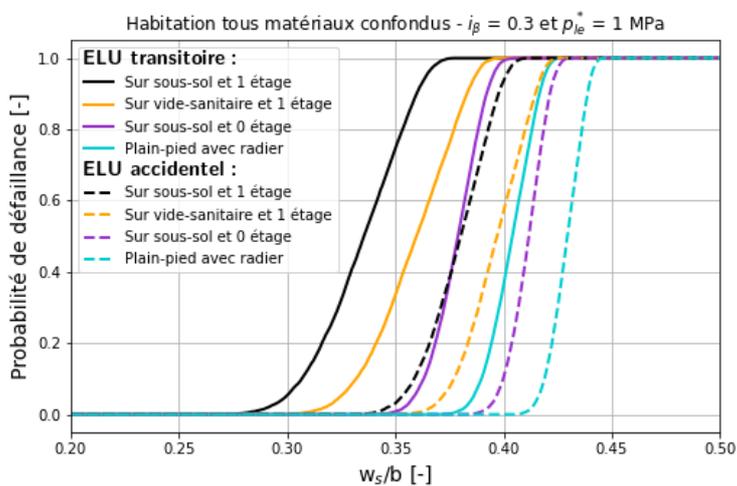


Figure 130 : Comparaison des courbes de fragilité des différents types de bâti avec radier (sur ou sans sous-sol, avec ou sans étage) tous matériaux confondus, pour  $i_{\beta} = 0.3$  et  $p_{le}^* = 1$  MPa



Centre siège Antony-Paris  
Direction de l'Appui aux Politiques Publiques  
1, rue Pierre-Gilles de Gennes  
CS 10030  
92761 Antony Cedex  
Tél. : +33 1 (0)1 40 96 61 21



Rejoignez-nous sur :

[www.inrae.fr](http://www.inrae.fr)



**MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**INRAE**