



Xynthia a touché le littoral atlantique français dans la nuit du 28 février 2010

- **41 décès par noyade** suite à la submersion des zones basses
  - ➔ **La localisation des décès est-elle due au hasard ?**
  - ➔ **Ne pourrait-on pas localiser *a priori* les zones où des décès sont possibles ?**

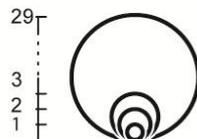
- **Zones noires** : 1 628 constructions détruites, coût = 315,7 millions d'€
  - ➔ **N'existe-t-il pas d'autres solutions pour protéger la vie humaine ?**

# Impacts de la tempête Xynthia sur les littoraux des régions Pays de la Loire et Poitou-Charentes

## Impact de la tempête Xynthia

 Communes ayant subies des inondations

Nombre de décès par noyade par commune



## Découpage administratif

 Communes littorales  
 Limites départementales  
 Limites régionales



Sources : SOGREAH, 2010 ; Pitié et Puech, 2010 ; Pitié et al., 2011 ; Vinet et al., 2011a ; Devaux et al., 2012 ; Geofla, Ignf, 2015



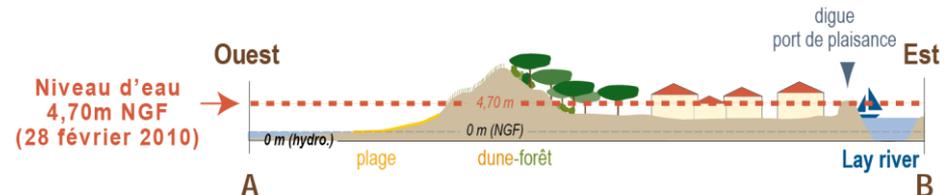
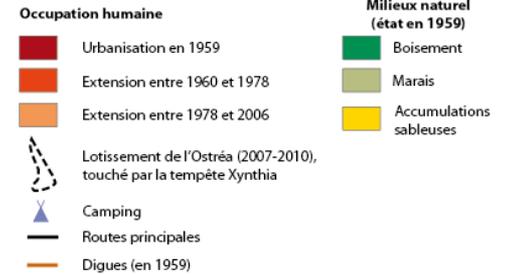
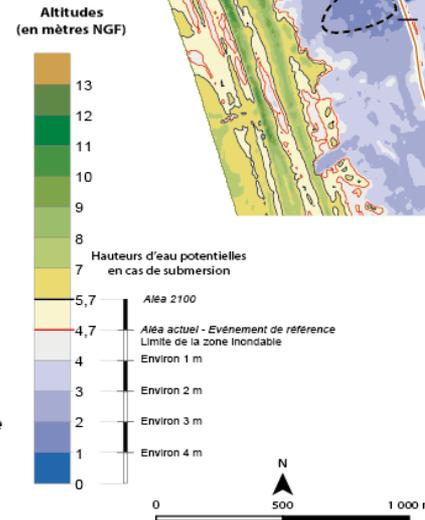
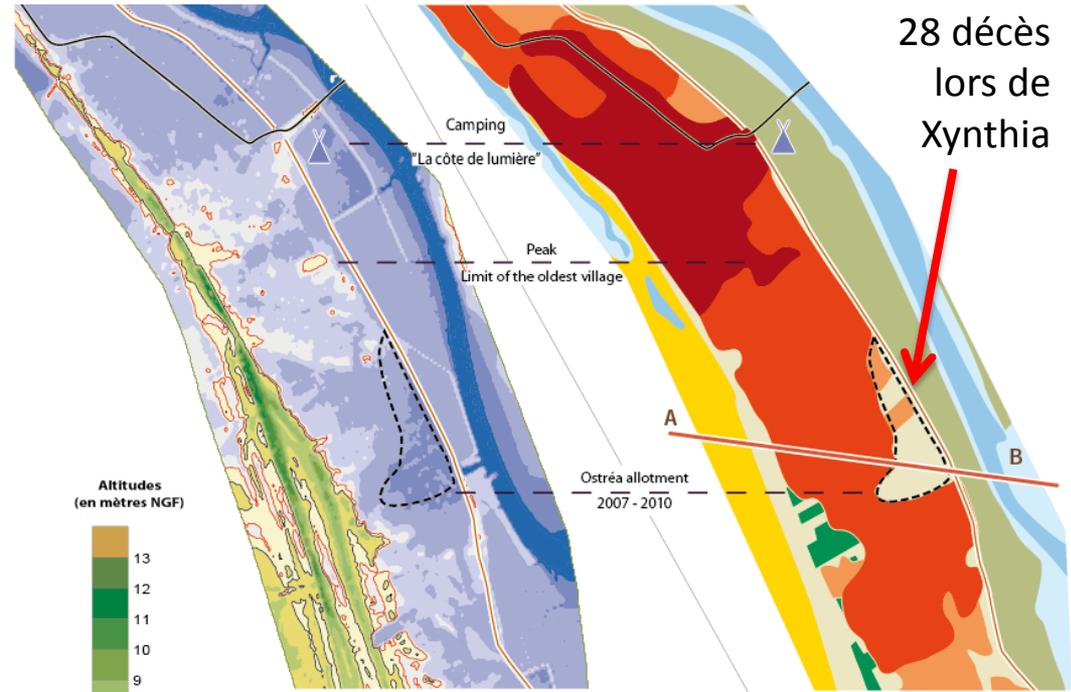
1. Topographie et submersion potentielle

2. Dynamique de l'urbanisation (entre 1959 et 2010)

# La Faute-sur-Mer

- 1) Un territoire bas
- 2) Urbanisation progressive des zones les plus basses
- 3) Proximité des constructions aux digues
- 4) Prédominance des constructions de plain-pied

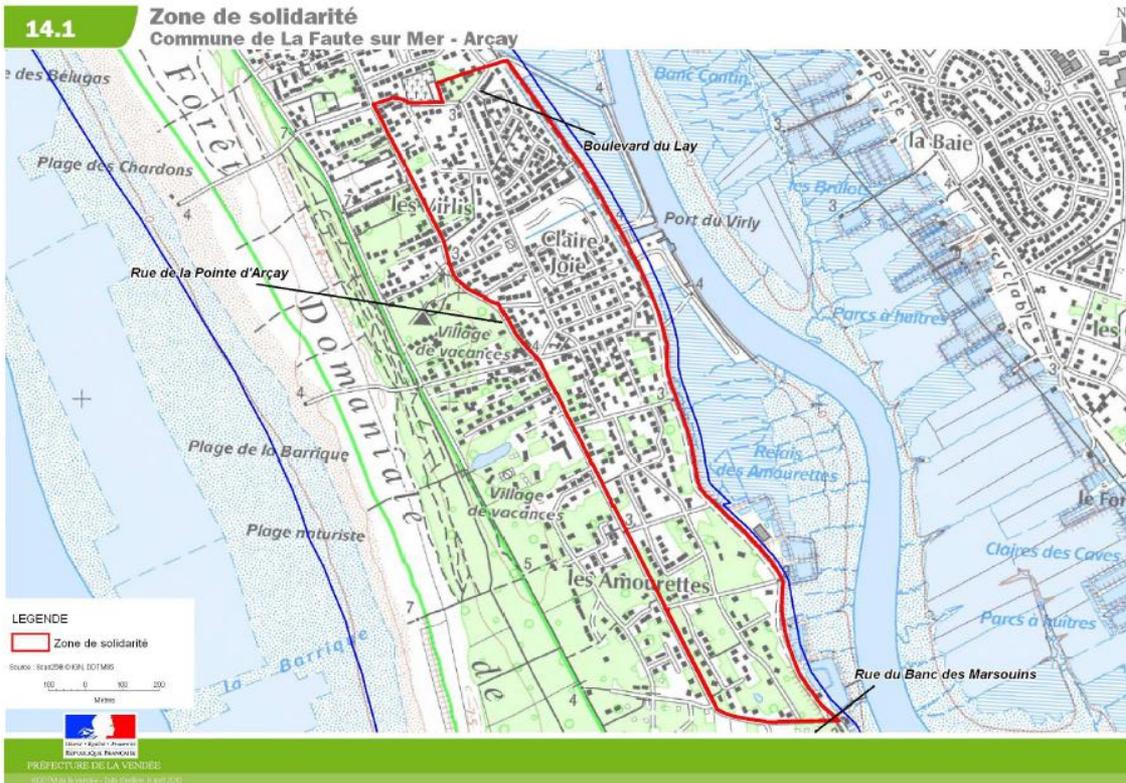
= zone de haute vulnérabilité humaine



Source : Chadenas C., Creach A., Mercier D. (2013). *The impact of storm Xynthia (2010) on French coastal risk management*, Journal of Coastal Conservation and Management

## Réponse de l'Etat : délimitation des « zones noires »

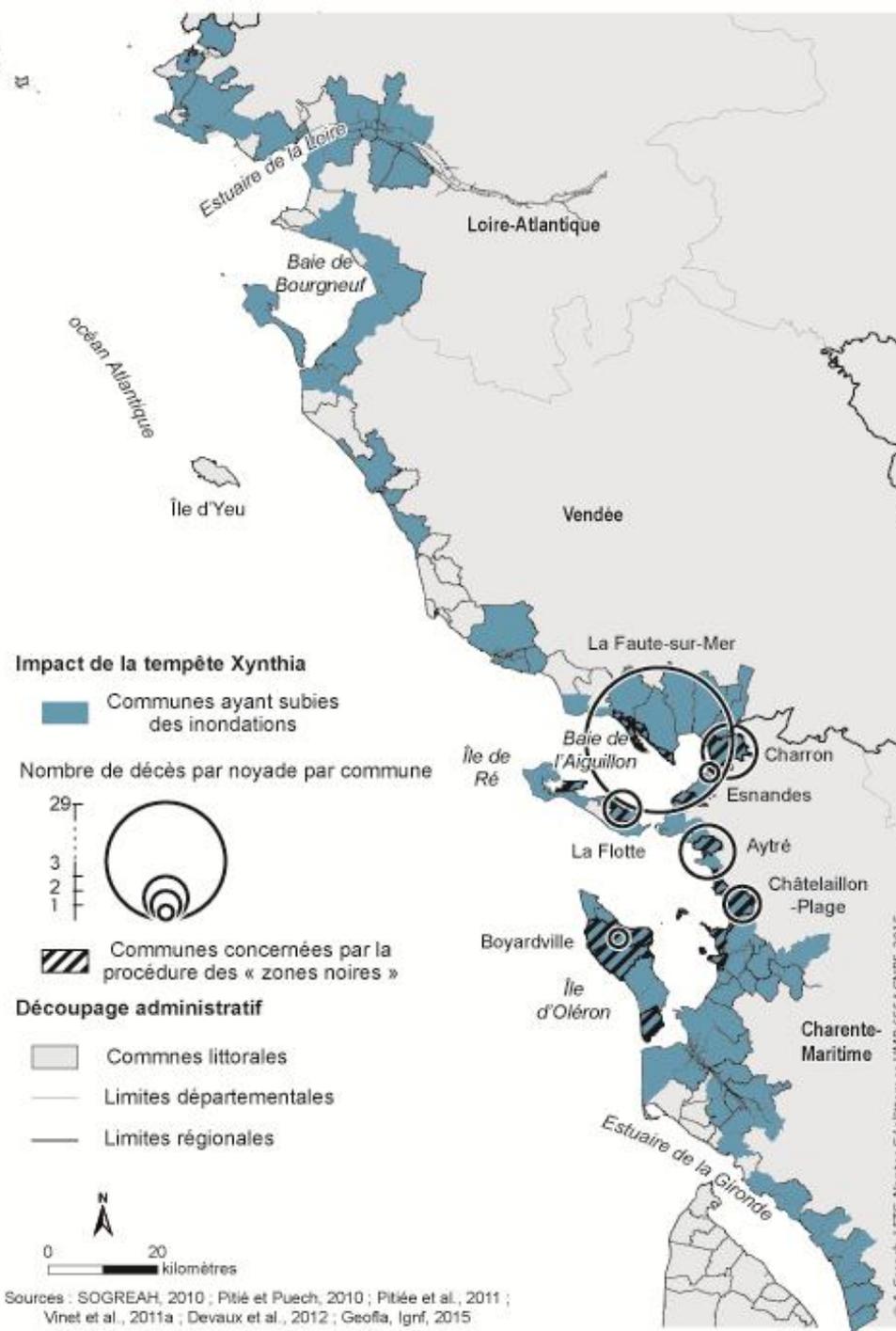
Exemple de La Faute-sur-Mer



Source : Pitié C et Puech P. 2010, Expertise complémentaire des zones de solidarité délimitées en Vendée suite à la tempête Xynthia survenue dans la nuit du 27 au 28 février 2010, CGEDD, 80p.



## Impacts de la tempête Xynthia et localisation des zones noires sur les littoraux des régions Pays de la Loire et Poitou-Charentes



## Problématique opérationnelle

1) Comment identifier les constructions résidentielles qui exposent leurs occupants à un risque potentiellement mortel en cas de submersion marine ?

→ Création de l'indice V.I.E.

2) Quelles solutions sont envisageables pour réduire cette vulnérabilité ?  
Quelles sont les plus pertinentes ?

→ Analyse coût-efficacité des mesures de gestion du risque de submersion marine



Crédits : D. Mercier, 2010



Crédits : D. Mercier, 2010

## Répond à des attentes institutionnelles et opérationnelles

Stratégie nationale du risque d'inondation – 2014

« **Augmenter la sécurité des populations exposées** »

Plan submersion rapide – 2011

« **Axe 1: La maîtrise de l'urbanisation et l'adaptation du bâti** »

Plan d'actions de prévention des inondations – 2011

« **Axe 5 : actions de réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens** »

Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte - 2012

« **Il est nécessaire de planifier maintenant et de préparer les acteurs à la mise en œuvre de la relocalisation à long terme des activités et des biens exposés aux risques littoraux, dans une perspective de recomposition de la frange littorale** » et « **justifier les choix d'aménagement opérationnels du trait de côte par des analyses coûts-bénéfices et des Analyses multicritères** ».

Sites d'étude retenus :

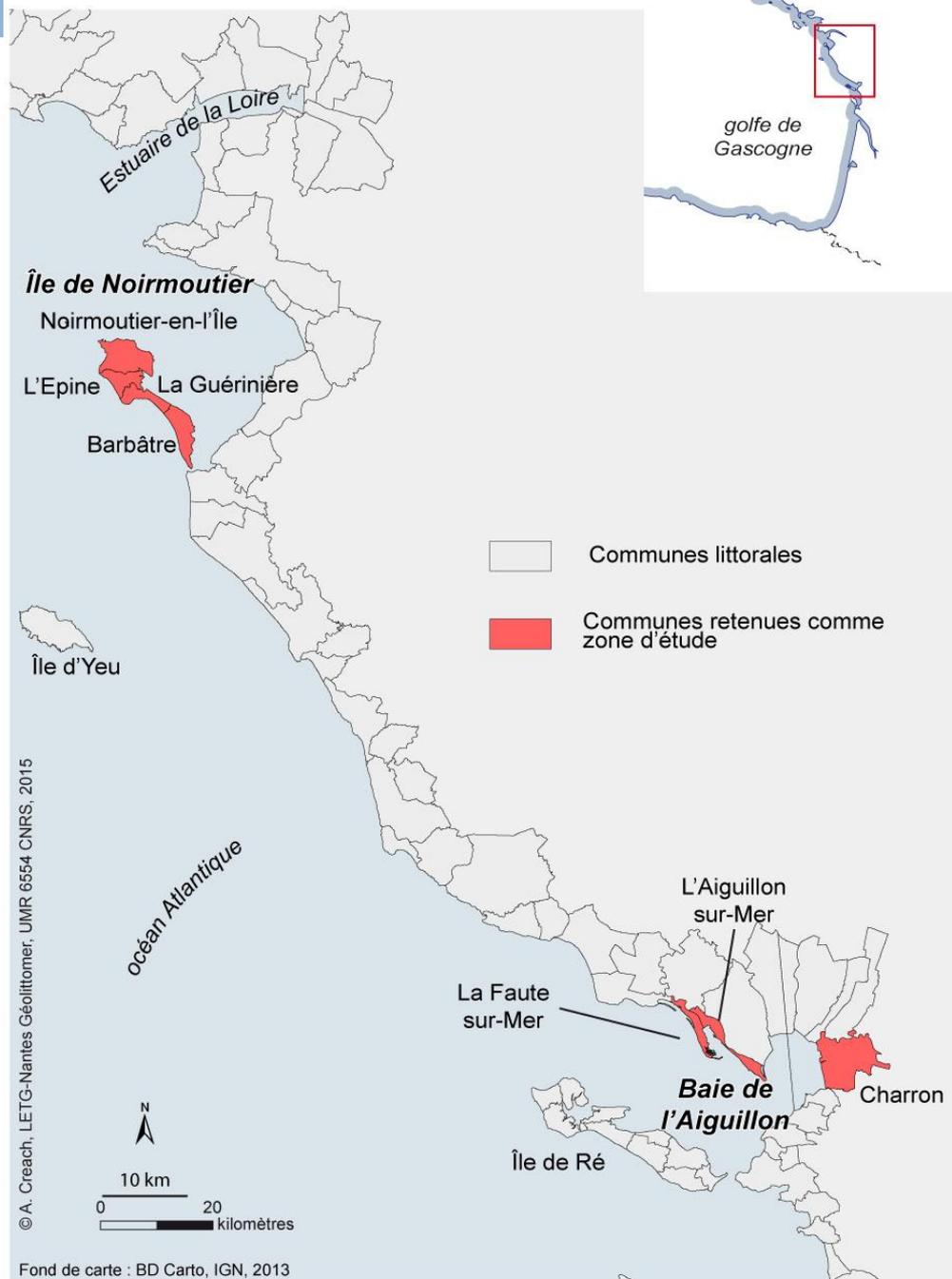
- Retour d'expérience :

Baie de l'Aiguillon (3 communes)

- Application prospective

Île de Noirmoutier (4 communes)

## Localisation des sites d'études

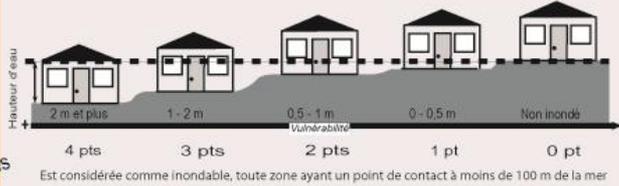


# Évaluation et cartographie de la vulnérabilité « extrême » : l'indice V.I.E.



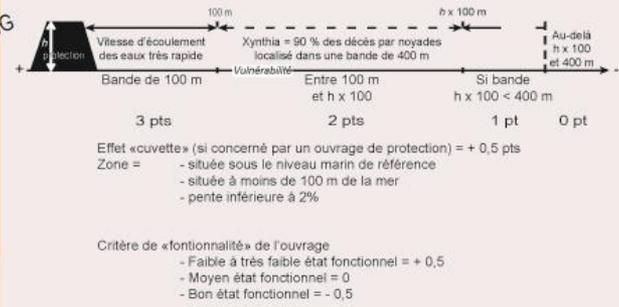
- Quelles sont les caractéristiques des constructions qui entraînent une exposition des occupants à un risque potentiellement mortel ?
- Comment diagnostiquer les situations à risque « extrême » ?
- Existe-t-il d'autres secteurs aux caractéristiques similaires le long du littoral atlantique français ?

**Exposition à la submersion marine (Exp)**



**Cr1**  
Hauteur d'eau  
Modèle Numérique de Terrain (MNT)  
Aléa

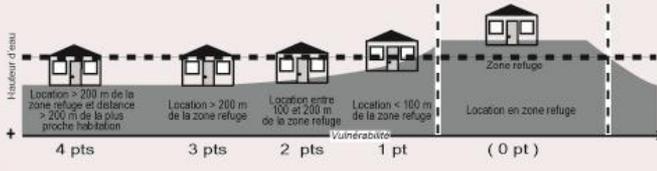
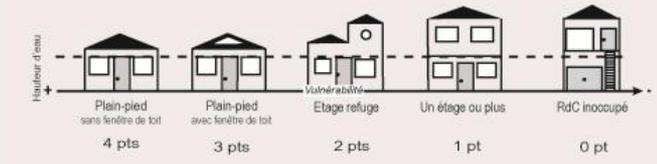
**Cr2**  
Protection contre la submersion  
Zone tampon



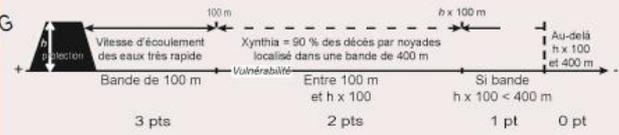
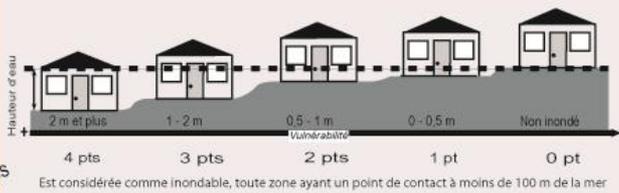
**Caractéristiques du bâti (Chr)**

**Cr3**  
Type architectural  
Typologie architecturale

**Cr4**  
Proximité d'une zone refuge  
Modèle Numérique de Terrain (MNT)



**Exposition à la submersion marine (Exp)**



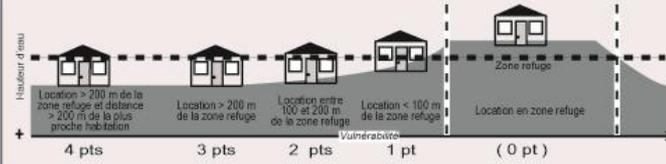
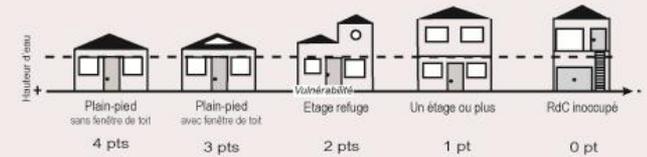
Effet «cuvette» (si concerné par un ouvrage de protection) = + 0,5 pts  
 Zone =  
 - située sous le niveau marin de référence  
 - située à moins de 100 m de la mer  
 - pente inférieure à 2%

Critère de «fonctionnalité» de l'ouvrage  
 - Faible à très faible état fonctionnel = + 0,5  
 - Moyen état fonctionnel = 0  
 - Bon état fonctionnel = - 0,5

**Cr1**  
Hauteur d'eau  
Modèle Numérique de Terrain (MNT)  
Aléa

**Cr2**  
Protection contre la submersion  
Zone tampon

**Caractéristiques du bâti (Chr)**

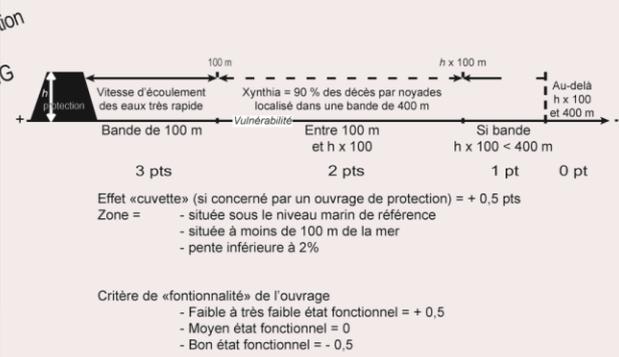
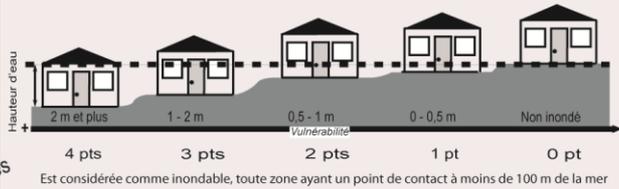


**Cr3**  
Type architectural  
Typologie architecturale

**Cr4**  
Proximité d'une zone refuge  
Modèle Numérique de Terrain (MNT)

**Indice V.I.E. (Vulnérabilité Intrinsèque Extrême)**  
 $V.I.E. = f \{ (Cr1 \times 2/3 + Cr4 \times 1/3) + Cr2 + Cr3 \}$   
 Si Cr1 = 0 alors V.I.E. = 0

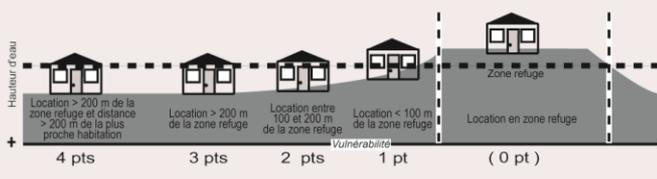
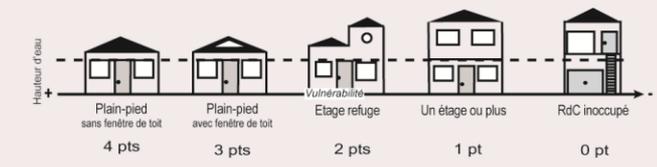
**Exposition à la submersion marine (Exp)**



**Cr1**  
Hauteur d'eau  
Modèle Numérique de Terrain (MNT)  
Aléa

**Cr2**  
Protection contre la submersion  
Zone tampon

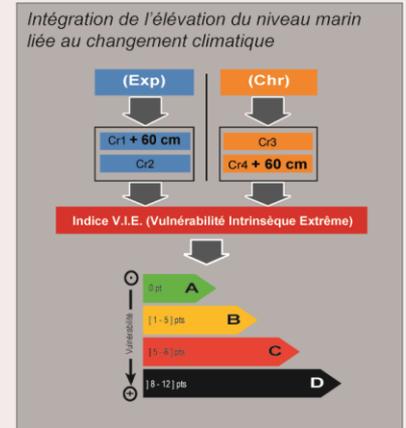
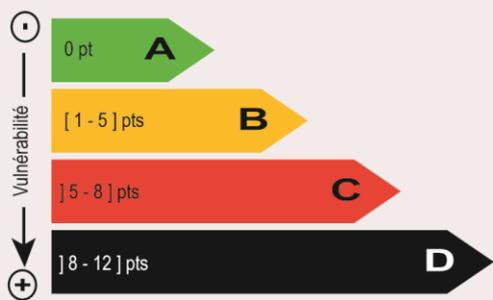
**Caractéristiques du bâti (Chr)**



**Cr3**  
Type architectural  
Typologie architecturale

**Cr4**  
Proximité d'une zone refuge  
Modèle Numérique de Terrain (MNT)

**Indice V.I.E. (Vulnérabilité Intrinsèque Extrême)**  
 $V.I.E. = f \{ (Cr1 \times 2/3 + Cr4 \times 1/3) + Cr2 + Cr3 \}$   
 Si Cr1 = 0 alors V.I.E. = 0



Paramètres

Critères

Pondération

Outil SIG

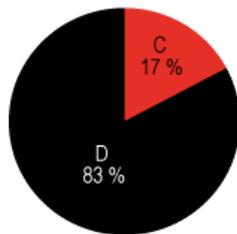
Indice Formule

Cartographie

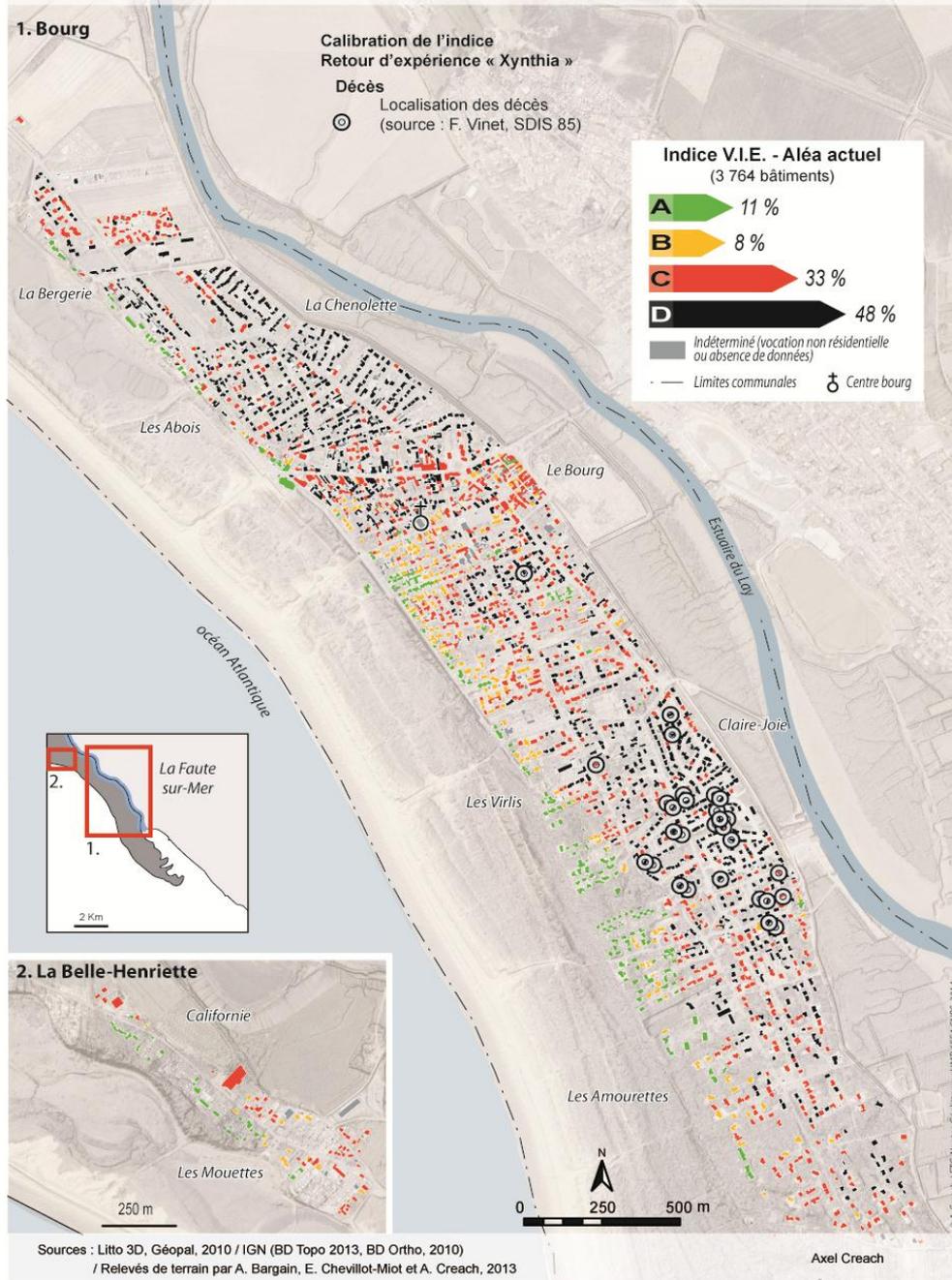
# Validation par retour d'expérience

## 1 – Localisation des décès

c. Constuctions concernées par des décès lors de Xynthia  
La Faute-sur-Mer



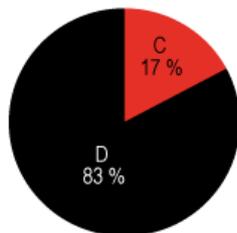
## Calibration de l'indice V.I.E. : résultats de la classification manuelle La Faute-sur-Mer (Scénario " actuel " - 4,70 m NGF)



# Validation par retour d'expérience

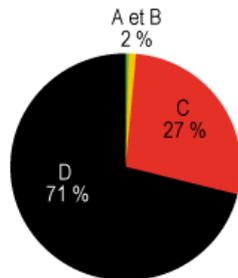
## 1 – Localisation des décès

c. Constructions concernées par des décès lors de Xynthia La Faute-sur-Mer



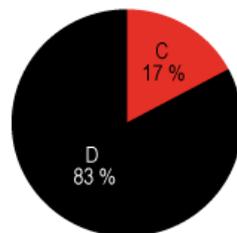
## 2 – Zones noires

a. A l'intérieur de la zone noire d'avril 2010 - La Faute-sur-Mer



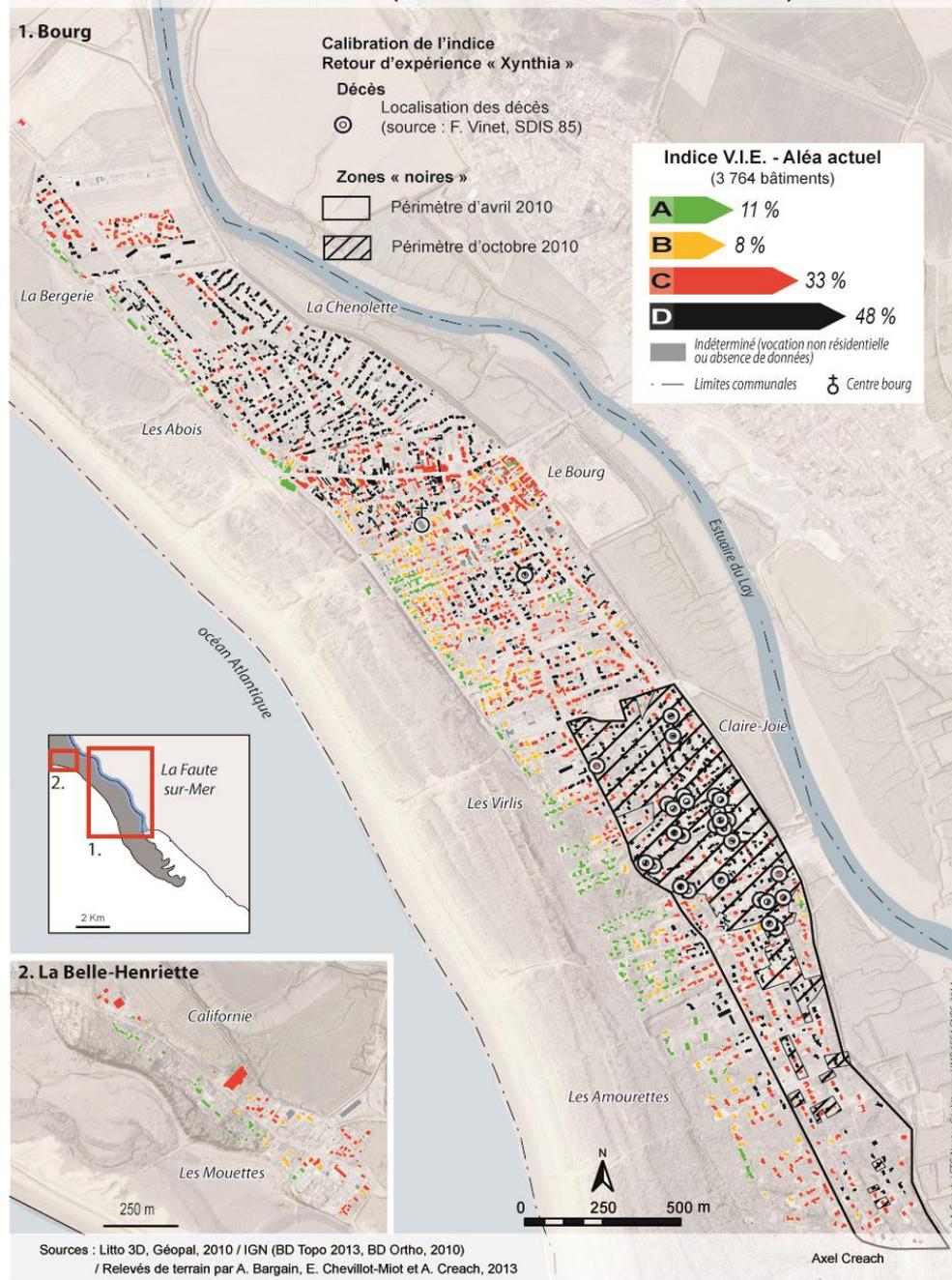
Avril 2010

b. A l'intérieur de la zone noire d'octobre 2010 - La Faute-sur-Mer



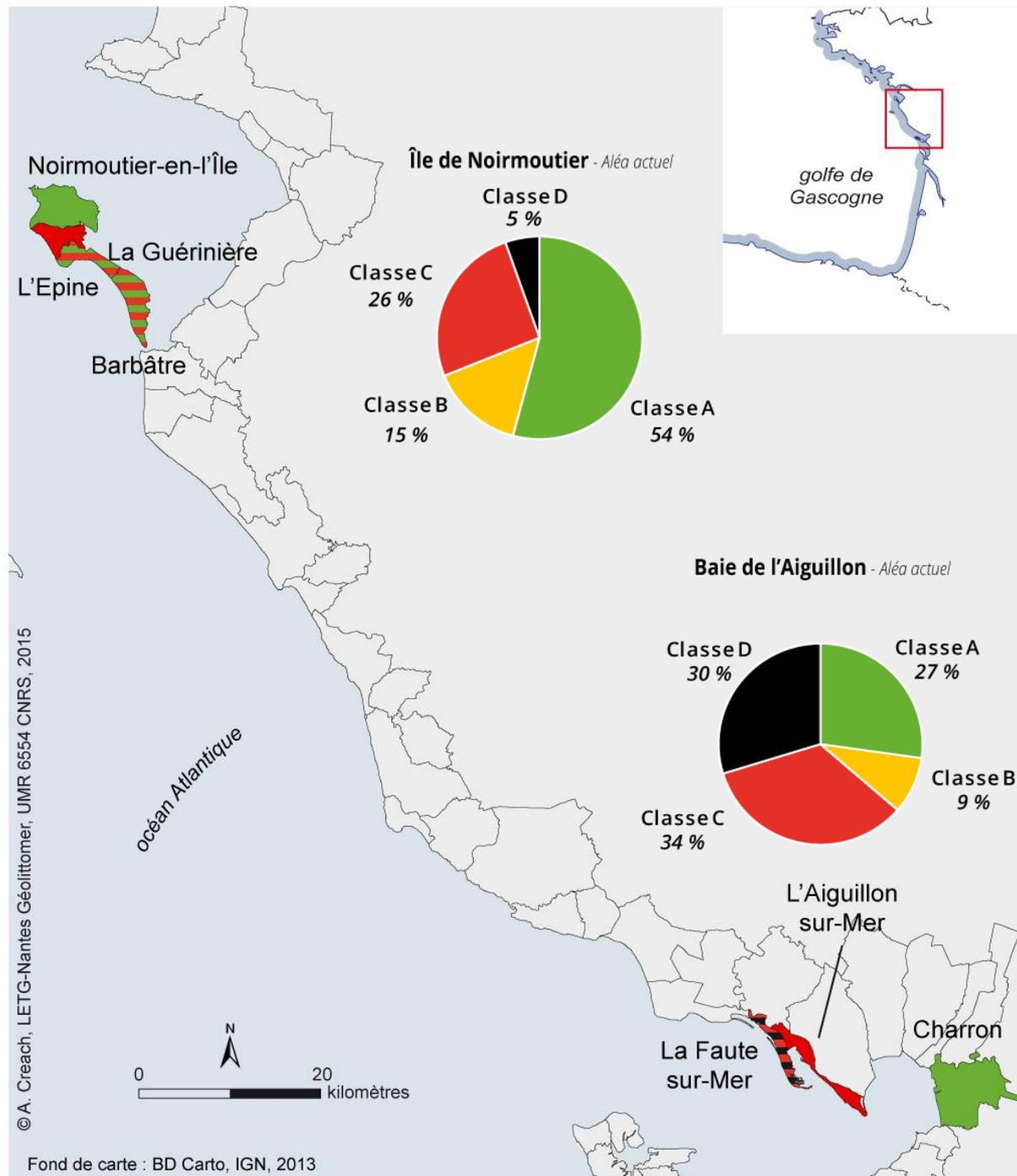
Octobre 2010

## Calibration de l'indice V.I.E. : résultats de la classification manuelle La Faute-sur-Mer (Scénario " actuel " - 4,70 m NGF)



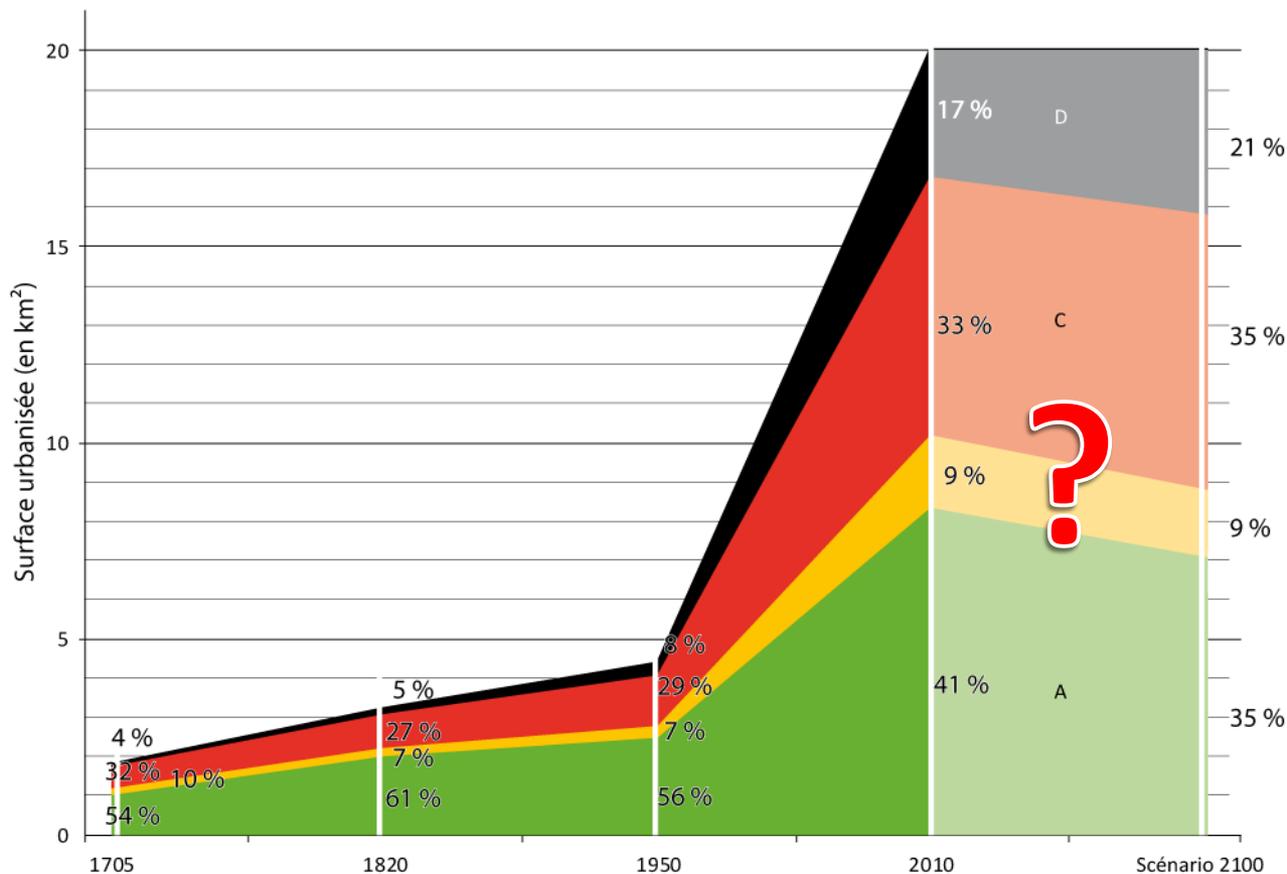
## Synthèse des résultats de l'indice V.I.E.

Vulnérabilité du bâti plus importante sur les communes de la baie de l'Aiguillon qu'à Noirmoutier



# Analyse diachronique des résultats

## Evolution entre 1705 et 2010



# Évaluation économique des mesures de réduction de la vulnérabilité « extrême » : utilisation de l'Analyse Coût-Efficacité



- Quelles solutions pour réduire la dangerosité des constructions résidentielles pour les occupants ?
- Quelle solution représente le meilleur compromis coûts / efficacité ?
- Existe-il une solution unique ?

**Figure 5.11. Méthode pour l'analyse coût-efficacité des mesures de réduction de la vulnérabilité**

## 1. Mesures de réduction de la vulnérabilité et coûts



### Mesure 1 Rehaussement & confortement des ouvrages de protection

Actions sur les ouvrages :

Rehaussement = extension bandes sécurité (Cr2)

Confortement = bon état fonctionnel des ouvrages (Cr2)

Coûts = investissement + entretien X m./l. ouvrages



### Mesure 2 Adaptation du bâti

Construction d'un étage refuge  
aux bâtiments de plain-pied  
Cr3 <= 2

Coûts = investissement X constructions  
plain-pied (classes rouge et noir)



### Mesure 3 Prévention & évacuation

- Evacuation : construction  
plateformes refuges (Cr4 <= 2)  
Kit d'attente des secours

- Prévention : PPR, PCS, DICRIM,  
Exercices d'évacuation

Coûts = investissement + mise à jour et entretien

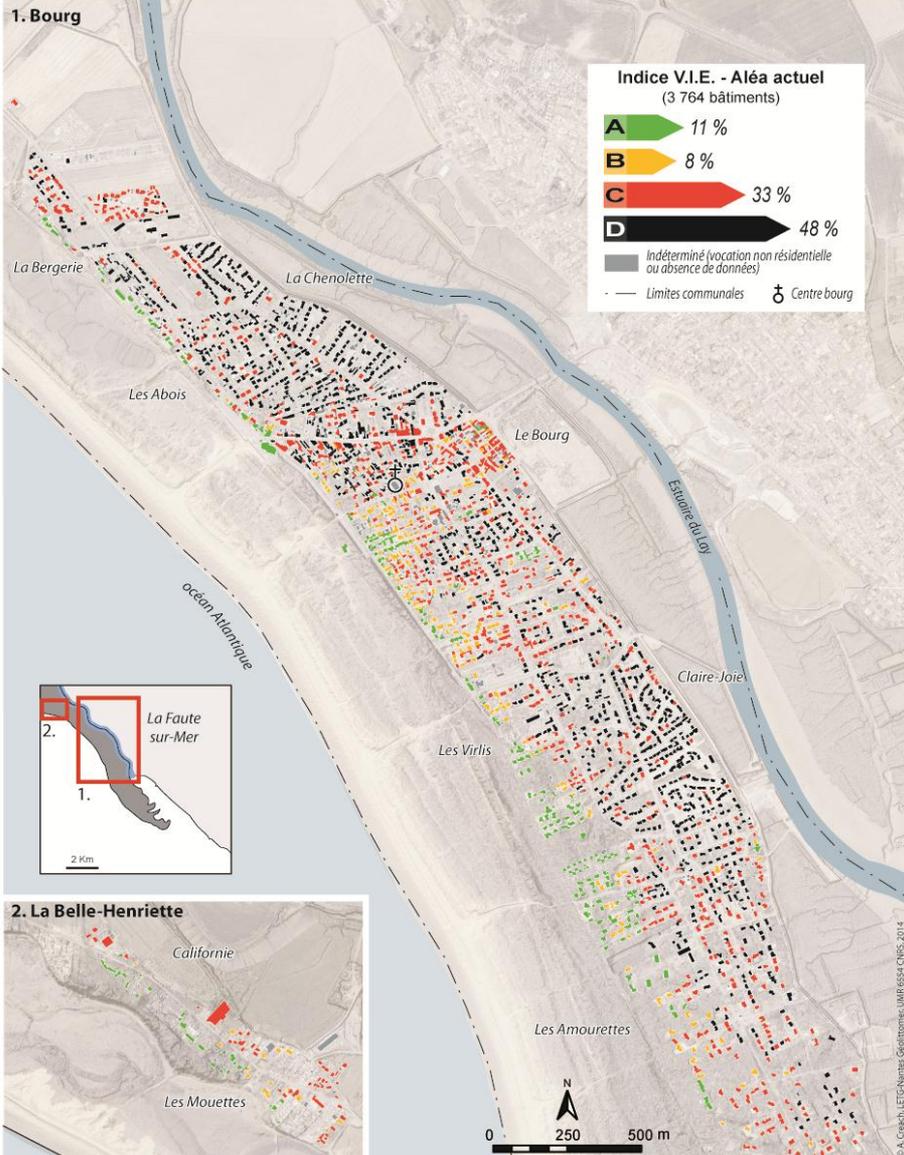


### Mesure 4 Relocalisation

Rachat et destructions des  
bâtiments identifiés en noir  
Classe D = ∅

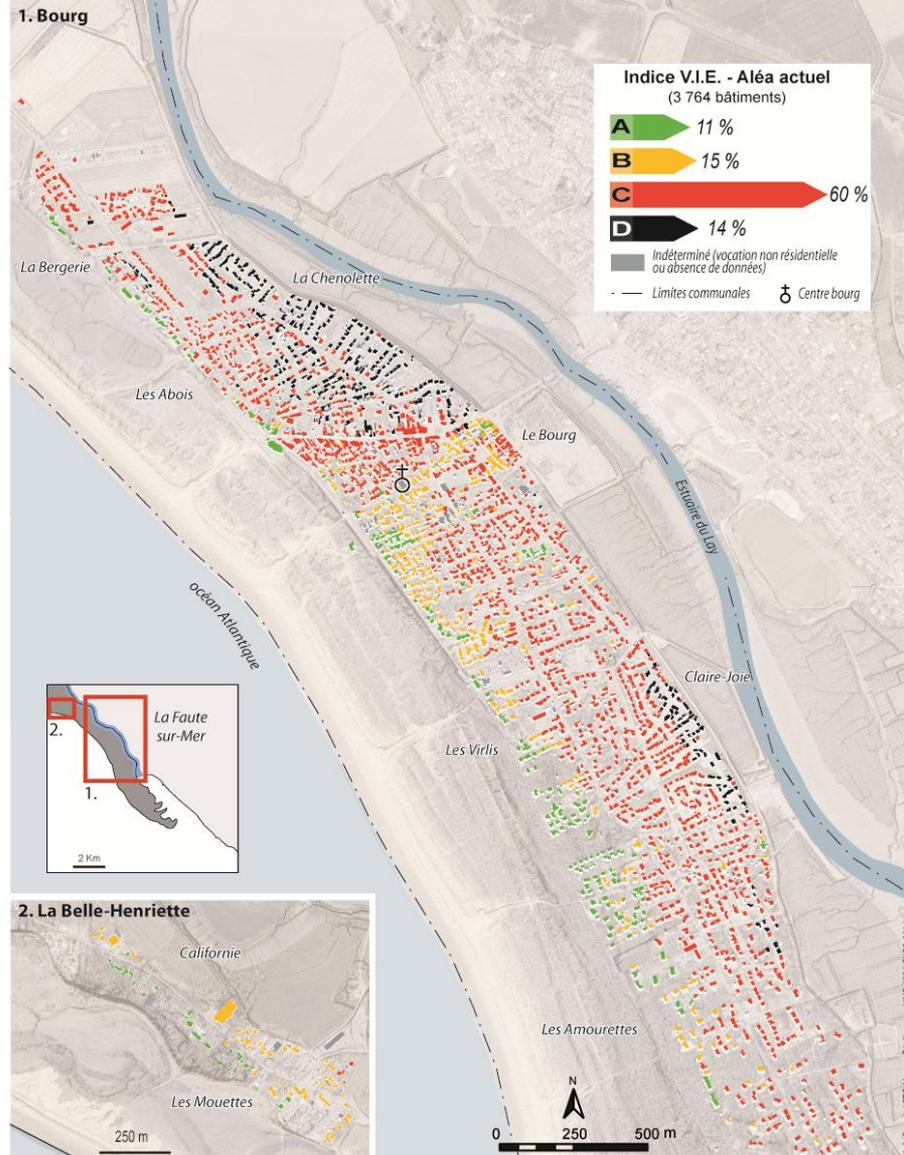
Coûts = rachat + destruction X nb constr. classe noire

Indice de Vulnérabilité Intrinsèque Extrême (V.I.E.)  
La Faute-sur-Mer (Scénario " actuel " - 4,70 m NGF)



Sources : Litto 3D, Géoparc, 2010 / IGN (BD Topo 2013, BD Ortho, 2010)  
/ Relevés de terrain par A. Bargain, E. Chevillot-Miot et A. Creach, 2013

Indice de Vulnérabilité Intrinsèque Extrême (V.I.E.)  
La Faute-sur-Mer (Mesure 2)



Sources : Litto 3D, Géoparc, 2010 / IGN (BD Topo 2013, BD Ortho, 2010)  
/ Relevés de terrain par A. Bargain, E. Chevillot-Miot et A. Creach, 2013

Figure 5.11. Méthode pour l'analyse coût-efficacité des mesures de réduction de la vulnérabilité

### 1. Mesures de réduction de la vulnérabilité et coûts



**Mesure 1**  
Rehaussement & confortement des ouvrages de protection

Actions sur les ouvrages :

Rehaussement = extension bandes sécurité (Cr2)

Confortement = bon état fonctionnel des ouvrages (Cr2)

Coûts = investissement + entretien X m./l. ouvrages



**Mesure 2**  
Adaptation du bâti

Construction d'un étage refuge aux bâtiments de plain-pied  
Cr3 <= 2

Coûts = investissement X constructions plain-pied (classes rouge et noir)



**Mesure 3**  
Prévention & évacuation

- Evacuation : construction plateformes refuges (Cr4 <= 2)  
Kit d'attente des secours

- Prévention : PPR, PCS, DICRIM, Exercices d'évacuation

Coûts = investissement + mise à jour et entretien



**Mesure 4**  
Relocalisation

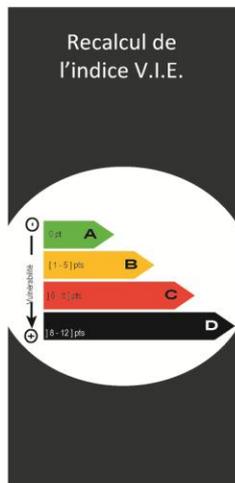
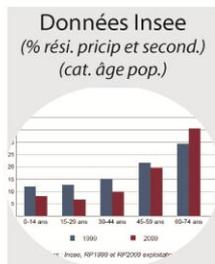
Rachat et destructions des bâtiments identifiés en noir  
Classe D = Ø

Coûts = rachat + destruction X nb constr. classe noire

### 2. Mesure de l'efficacité en nombre de vies humaines sauvées

Adaptation de la méthode des « Fonctions de mortalité »

(Jonkman et al., 2008)



Calcul de la mortalité potentielle

1. Détermination du nb. d'individus exposés à un risque mortel

Population exposée ( $N_{EXP}$ )  
= (nb. constr rouges + noires)  
X (% resi. princip. + second.)

Evacuation préventive (Mesure 3)

2. Détermination de la proba. de décéder parmi la pop. exposée à un risque mortel

Probabilité de décès ( $F_D$ )  
= (constr. noires / rouges)  
X (% cat. âge pop.)

3. Détermination du nb. de décès potentiels

Décès ( $N$ )  
=  $N_{EXP} \times F_D$

Légende

- Données
- Méthodes
- Résultats

Figure 5.11. Méthode pour l'analyse coût-efficacité des mesures de réduction de la vulnérabilité

### 1. Mesures de réduction de la vulnérabilité et coûts



**Mesure 1**  
Rehaussement & confortement des ouvrages de protection

Actions sur les ouvrages :

Rehaussement = extension bandes sécurité (Cr2)

Confortement = bon état fonctionnel des ouvrages (Cr2)

Coûts = investissement + entretien X m./l. ouvrages



**Mesure 2**  
Adaptation du bâti

Construction d'un étage refuge aux bâtiments de plain-pied  
Cr3 <= 2

Coûts = investissement X constructions plain-pied (classes rouge et noir)



**Mesure 3**  
Prévention & évacuation

- Evacuation : construction plateformes refuges (Cr4 <= 2)  
Kit d'attente des secours

- Prévention : PPR, PCS, DICRIM, Exercices d'évacuation

Coûts = investissement + mise à jour et entretien



**Mesure 4**  
Relocalisation

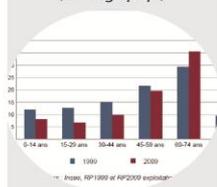
Rachat et destructions des bâtiments identifiés en noir  
Classe D = Ø

Coûts = rachat + destruction X nb constr. classe noire

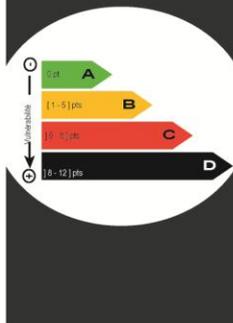
### 2. Mesure de l'efficacité en nombre de vies humaines sauvées

Adaptation de la méthode des « Fonctions de mortalité »  
(Jonkman et al., 2008)

Données Insee  
(% rési. princip. et second.)  
(cat. âge pop.)



Recalcul de l'indice V.I.E.



Calcul de la mortalité potentielle

1. Détermination du nb. d'individus exposés à un risque mortel

Population exposée ( $N_{EXP}$ )  
= (nb. constr rouges + noires)  
X (% resi. princip. + second.)

Evacuation préventive (Mesure 3)

2. Détermination de la proba. de décéder parmi la pop. exposée à un risque mortel

Probabilité de décès ( $F_D$ )  
= (constr. noires / rouges)  
X (% cat. âge pop.)

3. Détermination du nb. de décès potentiels

Décès ( $N$ )  
=  $N_{EXP} \times F_D$

Légende

- Données
- Méthodes
- Résultats

### 3. Analyse coût-efficacité

Situation sans mesure

Résultat initial de l'indice V.I.E.



Coûts = nuls

Efficacité : détermination du nb. de décès potentiels selon méthode 2.

ACE  
Comparaison situation sans mesure Vs. avec mesure  
Calcul efficacité =  $N_{\text{sans mesure}} - N_{\text{avec mesure}}$

Figure 5.11. Méthode pour l'analyse coût-efficacité des mesures de réduction de la vulnérabilité

### 1. Mesures de réduction de la vulnérabilité et coûts



**Mesure 1**  
Rehaussement & confortement des ouvrages de protection

Actions sur les ouvrages :

Rehaussement = extension bandes sécurité (Cr2)

Confortement = bon état fonctionnel des ouvrages (Cr2)

Coûts = investissement + entretien X m./l. ouvrages



**Mesure 2**  
Adaptation du bâti

Construction d'un étage refuge aux bâtiments de plain-pied  
Cr3 <= 2

Coûts = investissement X constructions plain-pied (classes rouge et noir)



**Mesure 3**  
Prévention & évacuation

- Evacuation : construction plateformes refuges (Cr4 <= 2)  
Kit d'attente des secours

- Prévention : PPR, PCS, DICRIM, Exercices d'évacuation

Coûts = investissement + mise à jour et entretien



**Mesure 4**  
Relocalisation

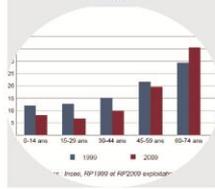
Rachat et destructions des bâtiments identifiés en noir  
Classe D = Ø

Coûts = rachat + destruction X nb constr. classe noire

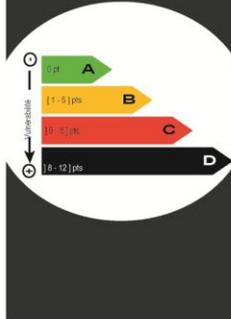
### 2. Mesure de l'efficacité en nombre de vies humaines sauvées

Adaptation de la méthode des « Fonctions de mortalité »  
(Jonkman et al., 2008)

Données Insee  
(% resi. princip. et second.)  
(cat. âge pop.)



Recalcul de l'indice V.I.E.



Calcul de la mortalité potentielle

1. Détermination du nb. d'individus exposés à un risque mortel

Population exposée ( $N_{EXP}$ )  
= (nb. constr rouges + noires)  
X (% resi. princip. + second.)

Evacuation préventive (Mesure 3)

2. Détermination de la proba. de décéder parmi la pop. exposée à un risque mortel

Probabilité de décès ( $F_D$ )  
= (constr. noires / rouges)  
X (% cat. âge pop.)

3. Détermination du nb. de décès potentiels

Décès ( $N$ )  
=  $N_{EXP} \times F_D$

Légende

- Données
- Méthodes
- Résultats

### 3. Analyse coût-efficacité

Situation sans mesure

Résultat initial de l'indice V.I.E.



Coûts = nuls

Efficacité : détermination du nb. de décès potentiels selon méthode 2.

ACE  
Comparaison situation sans mesure Vs. avec mesure  
Calcul efficacité =  $N$  sans mesure -  $N$  avec mesure

#### Présentation des résultats

1. Ratio différentiel Coût-Efficacité

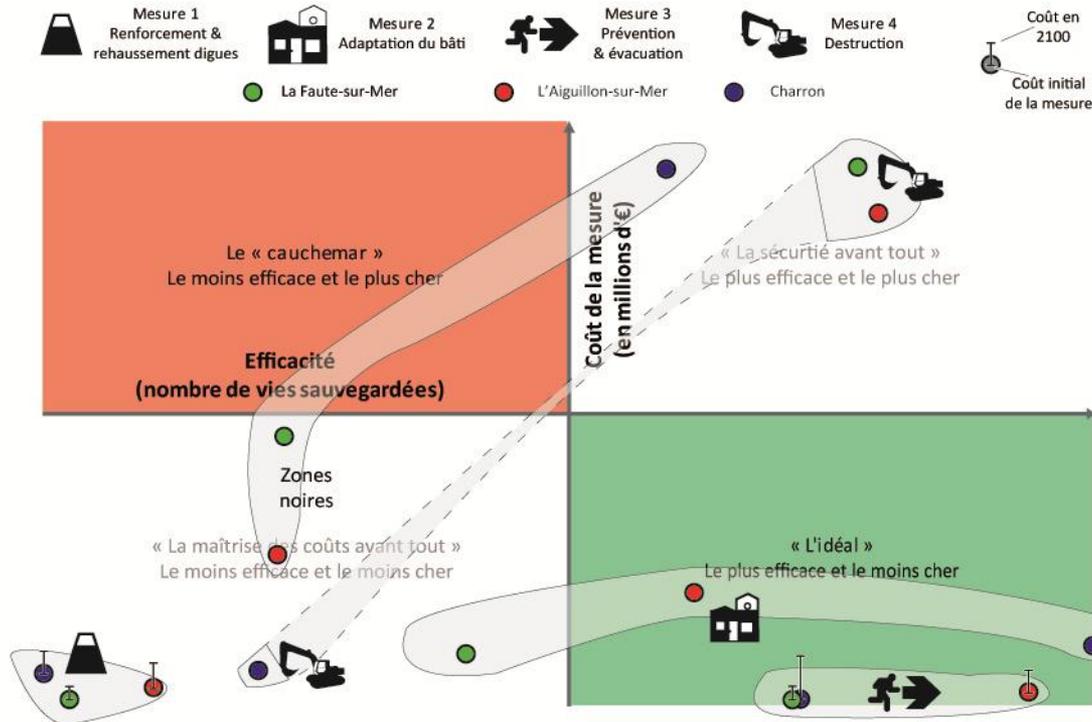
$$= \frac{\text{coût mesure}}{\text{efficacité mesure}}$$

2. Plan coût-efficacité



# Analyse ex-post : rapport coût / efficacité limité des zones noires

Coût / vie humaine sauvegardée (en millions d'€)	Zones noires		Mesure 1		Mesure 2		Mesure 3		Mesure 4	
	Aléa actuel	Aléa 2100	Aléa actuel	Aléa 2100	Aléa actuel	Aléa 2100	Aléa actuel	Aléa 2100	Aléa actuel	Aléa 2100
Actuel	12,9	12,3	2,0	1,7	1,6	1,8	0,2	0,2	6,4	8,3
20 ans	12,9	12,3	2,5	2,1	1,6	1,8	0,3	0,3	6,4	8,3
50 ans	12,9	12,3	2,8	2,4	1,6	1,8	0,4	0,3	6,4	8,3
100 ans	12,9	12,3	3,1	2,6	1,6	1,8	0,5	0,4	6,4	8,3



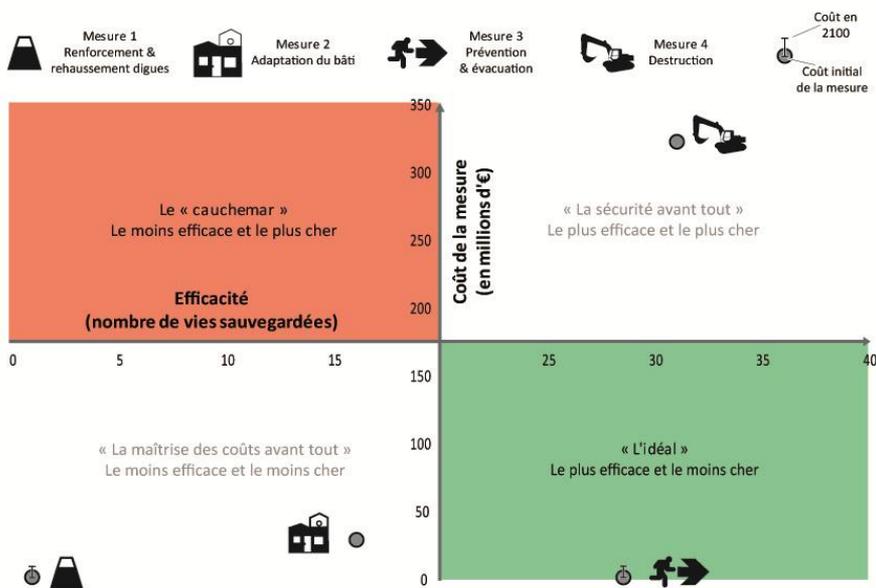
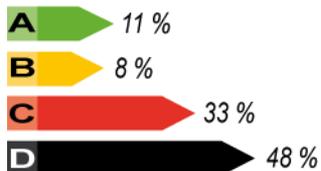
# Analyse *ex-ante* : priorités différentes selon le niveau de vulnérabilité des communes

## Cas d'une commune fortement exposée

### La Faute-sur-Mer

Résultat de l'indice VIE sans mesure

Indice V.I.E. - Aléa actuel  
(3 764 bâtiments)

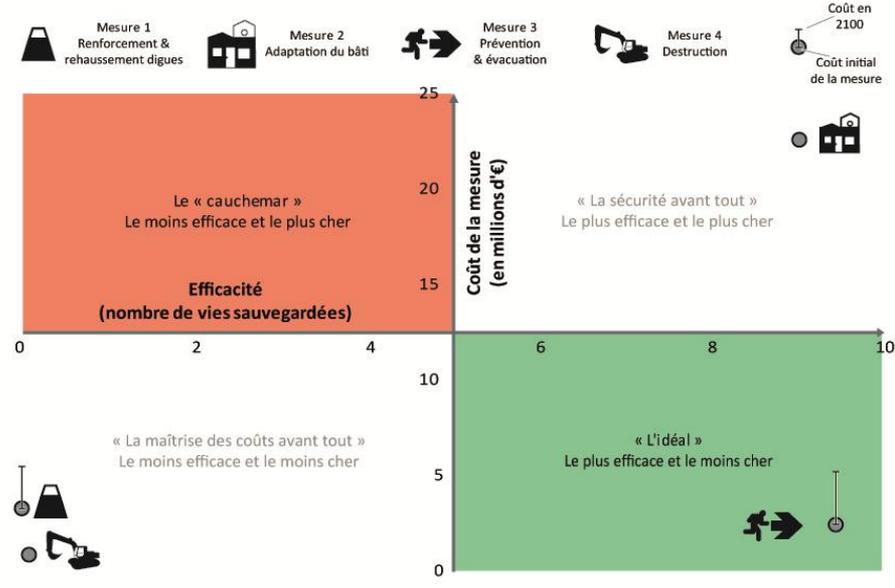
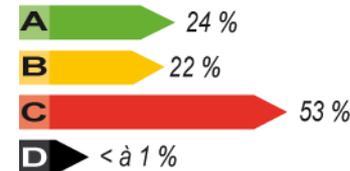


## Cas d'une commune faiblement exposée

### L'Epine

Résultat de l'indice VIE sans mesure

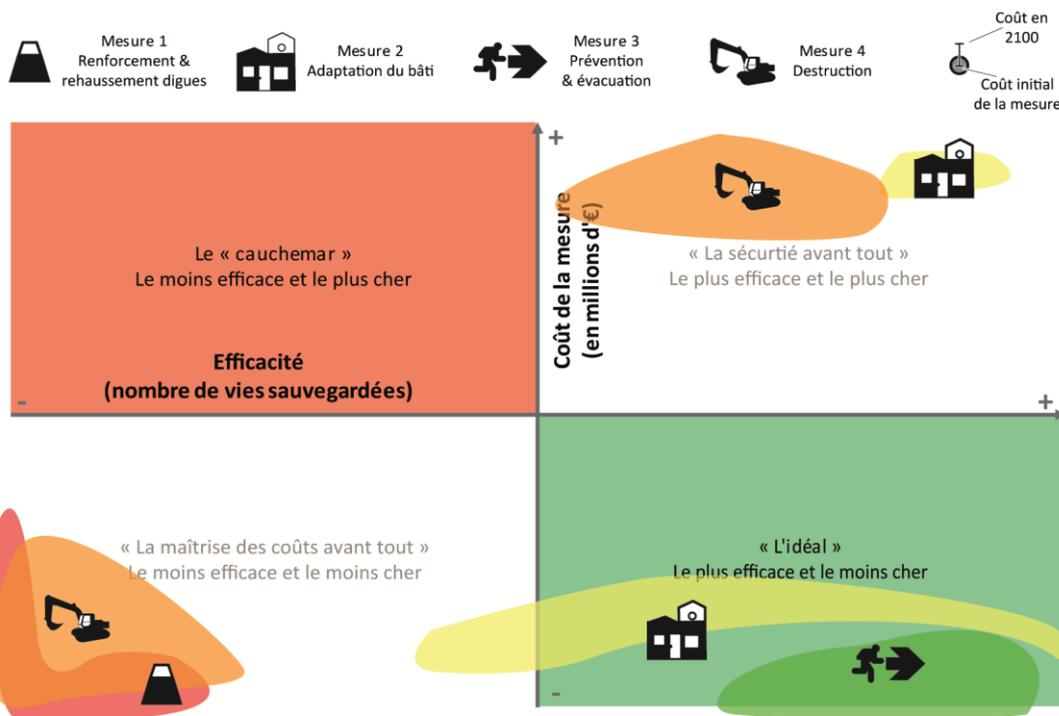
Indice V.I.E. - Aléa actuel  
(3 294 bâtiments)



# Vers un renforcement de la prévention ?

Coût / vie humaine sauvegardée (en millions d'€)	Mesure 1		Mesure 2		Mesure 3		Mesure 4	
	Aléa actuel	Aléa 2100						
Actuel	1,2	1,2	1,9	2,4	0,2	0,2	9,4	10,3
20 ans	1,5	1,5	1,9	2,4	0,3	0,3	9,4	10,3
50 ans	1,7	1,8	1,9	2,4	0,4	0,3	9,4	10,3
100 ans	1,9	1,9	1,9	2,4	0,5	0,4	9,4	10,3

## Synthèse du rapport coût / efficacité des mesures



## Conclusion

- 1) Diagnostic de la vulnérabilité
  - ➔ Il est possible de cartographier préventivement les zones de danger mortel.
  
- 2) Réduction de la vulnérabilité
  - ➔ L'efficacité de la protection n'en fait pas une mesure viable pour protéger la vie humaine.
  - ➔ le coût et l'efficacité de la prévention en font une mesure à appliquer à tous les coups.
  - ➔ en fonction de l'exposition de la commune, une mesure structurelle distincte peut être envisagée (adaptation / déconstruction).
  - ➔ il est donc possible de hiérarchiser les actions en fonction de leur niveau d'efficacité en matière de protection et de dépense de l'argent public.

## Perspectives

- automatisation de la méthode pour permettre un transfert vers les praticiens
- élargissement au risque d'inondation fluviale (moyennant adaptation des critères)
- en combinant ce travail avec des travaux sur les dommages au bâti, possibilité de construire une approche intégrée de mesure de la vulnérabilité d'un territoire.

## Applications opérationnelles possibles

- Services Départementaux d'Incendie et de Secours
  - pré positionnement des moyens en cas d'alerte
- PAPI
  - : Prioriser les actions à financer : : possibilité de coupler à une ACB sur les dommages au bâti et d'intégrer l'ensemble à une AMC
- Collectivités
  - aide à la décision dans le cadre de la loi GEMAPI
- PGRI et TRI
  - Diagnostic des territoires les plus à risques pour les futurs PGRI ?
- Assurances







**Vers la relocalisation  
des activités et des biens**

5 territoires en expérimentation

Séminaire national de lancement du 14 février 2013

  
 Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie  
 www.developpement-durable.gouv.fr

*Merci pour votre attention !*



*Thèse disponible sur TEL*  
*<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01275600>*  
*Contact : [Axel.Creach@univ-nantes.fr](mailto:Axel.Creach@univ-nantes.fr)*

SDIS 17 Sylvain Roussillon