

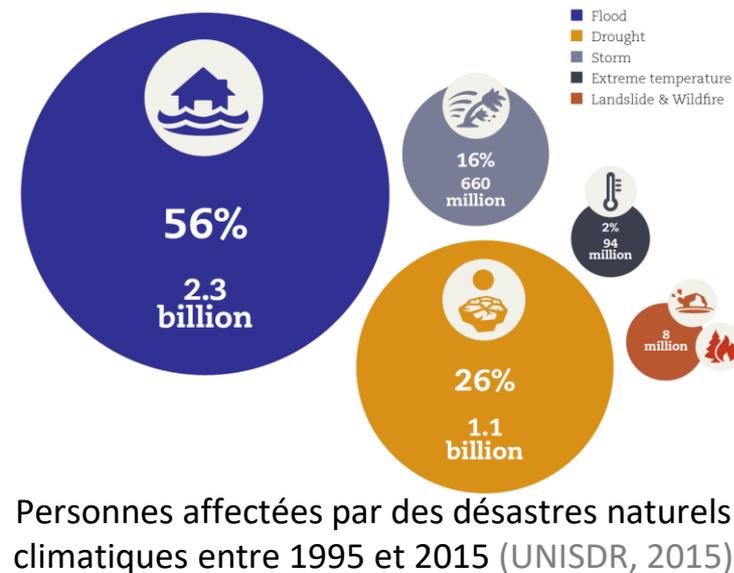
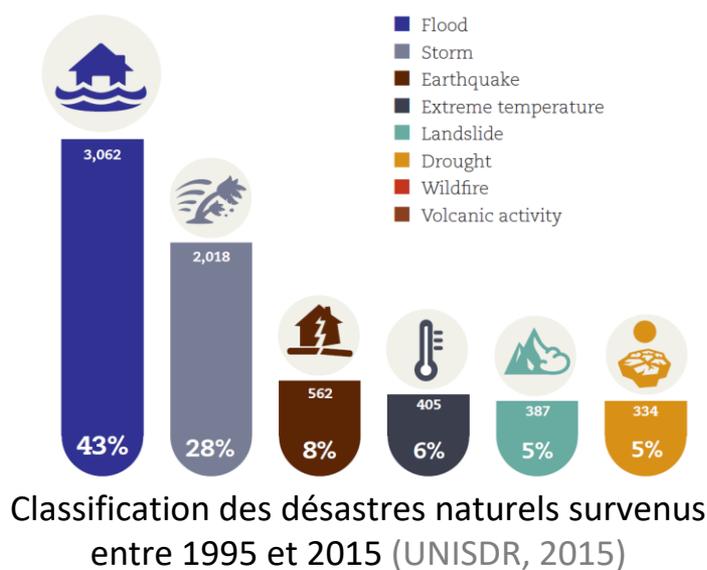


Inondations et cartographie du risque

Sébastien Erpicum, Pierre Archambeau,
Benjamin Dewals, Michel Piroton
Verviers - 3 avril 2023

Les inondations

- Désastre naturel le plus fréquent sur Terre



- L'aléa inondation et la vulnérabilité sont en augmentation constante

Crue éclair (« flash flood ») à Liège (Sart Tilman)

90 mm de pluie en 2h le 29 mai 2008



Crue de juillet 2021 en Wallonie

Jusque 280 mm en 3 jours dans le bassin de la Vesdre



Crue de juillet 2021 en Wallonie

Jusque 280 mm en 3 jours dans le bassin de la Vesdre



39 personnes décédées



30 000 personnes relogées



11.490 habitations impactées



1.330 entreprises impactées

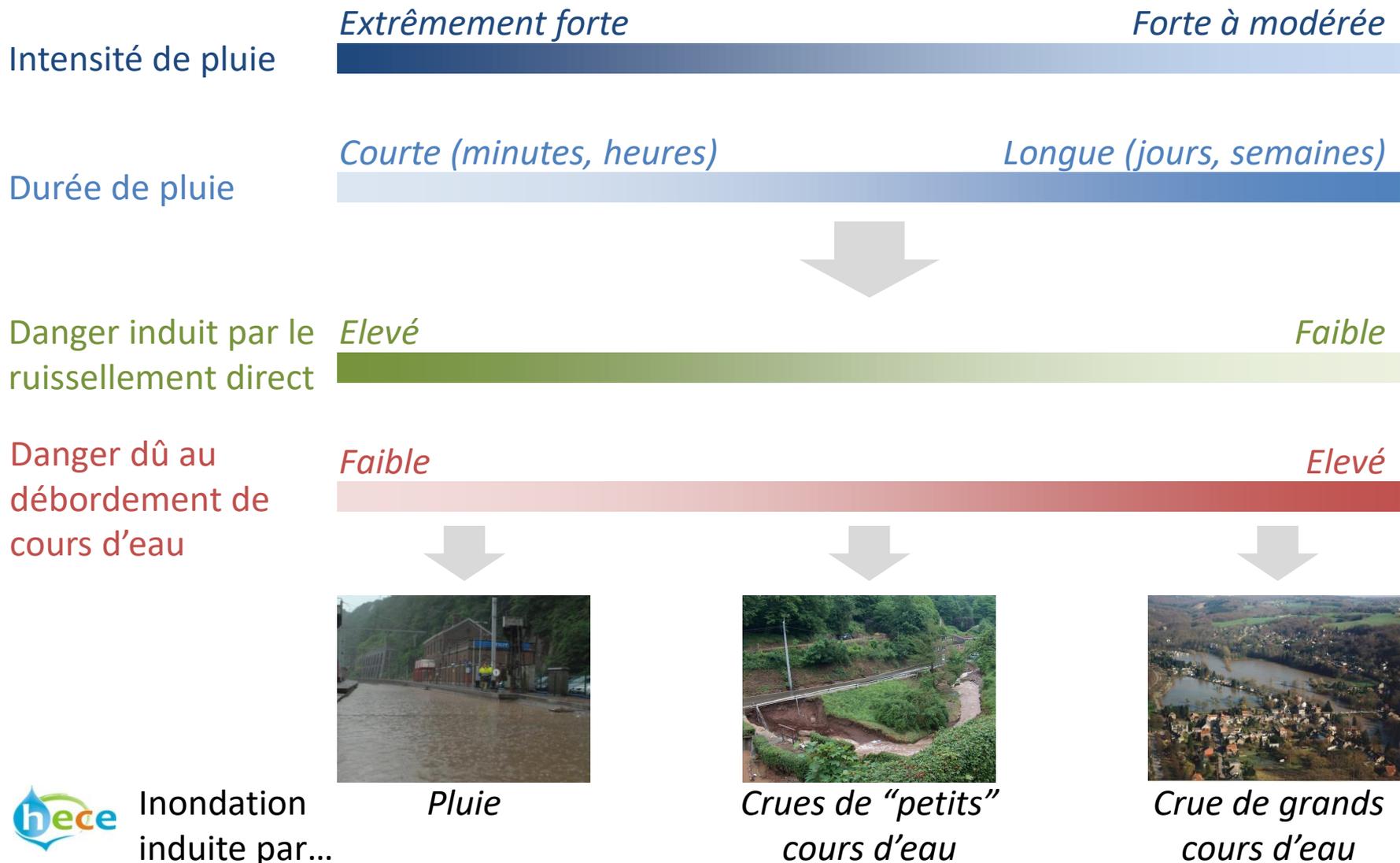


5,3 milliards €



- Bassin de la Meuse
- Meuse et principaux affluents
- Limites de sous bassins

Inondations par ruissellement (*pluvial flooding*) et par débordement (*river flooding*)



Inondation induite par...

Pluie

Crues de "petits" cours d'eau

Crue de grands cours d'eau

Plan de l'exposé

- Qu'est ce que le risque inondations ?
- Extrêmes hydrologiques
- Cartographie de l'aléa et du risque inondations
- Que faire pour minimiser le risque ?
- Et demain ?
- Recherche et perspectives
- Conclusions

Risque inondations

ALEA D'INONDATION



Extrême hydro-météorologique

Pluie-ruissellement sur le bassin versant



Crue des cours d'eau

Capacité de transport du réseau de rivières



Inondation du lit majeur

VULNERABILITE

Habitations, industrie



Agriculture



Trafic



Vulnérabilité de la zone inondable



Le dommage **potentiel**, c'est le croisement de l'**aléa d'inondation** et de la **vulnérabilité**

Mesures de protection et gestion de crise pour minimiser les **dommages réels**



Domage (potentiel)

Extrêmes hydrologiques

Exemple de la Meuse



Marques dans la cathédrale de Liège
(1643, 1740 & 1926)

- 1643 Crue la plus extrême répertoriée
(200 morts à Huy, 80 à Liège)
- 1740 Plusieurs ruptures de digues aux Pays Bas
- 1926 Dernières inondations de Liège



Bvd Avroy



R. Guillemins

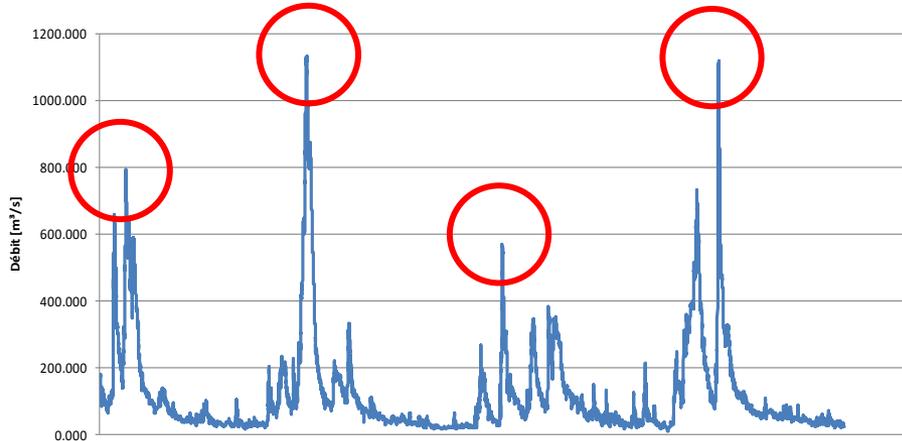
Trois générations plus tard ...

- 1993 Dégâts considérables, partiellement dûs à une réduction de la perception du risque
- 1995 25 M € de dommages en Wallonie

2002, 2003, 2021 Crues sur les affluents (Ourthe, Semois ...)

Extrêmes hydrologiques

L'estimation de la fréquence des crues se base sur une analyse des événements historiques

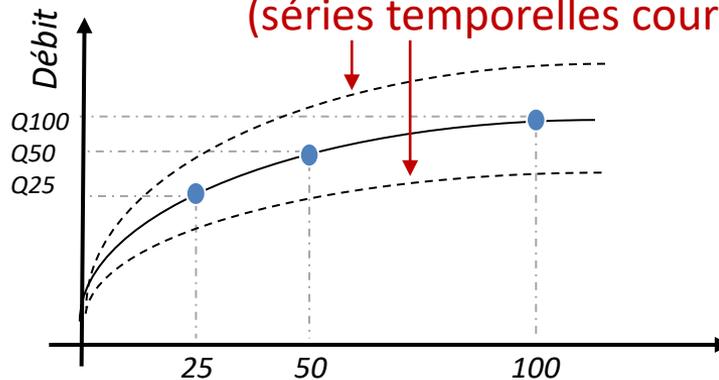


Mesures sur plusieurs années

Sélection d'un événement par an

Date	Débits [m³/s]
16/02/1990 12:00	1548.1885
6/01/1991 1:00	1548.672
23/12/1991 10:00	1006.804
13/01/1993 9:00	1778.427
22/12/1993 9:00	2159.097
31/01/1995 7:00	2236.912
24/12/1995 15:00	660.955
26/02/1997 8:00	914.365
6/01/1998 14:00	828.216
2/11/1998 6:00	1175.25
27/12/1999 12:00	1576.229
7/01/2001 0:00	1544.255
14/02/2002 2:00	1554.532
4/01/2003 0:00	1866.607
20/01/2004 21:00	1035.994
14/02/2005 11:00	842.645
11/03/2006 10:00	815.543
19/01/2007 11:00	1180.7
8/12/2007 6:00	1086.1
24/01/2009 17:00	1088.6
1/03/2010 15:00	932.02

Gamme d'incertitude (séries temporelles courtes)



Période de retour

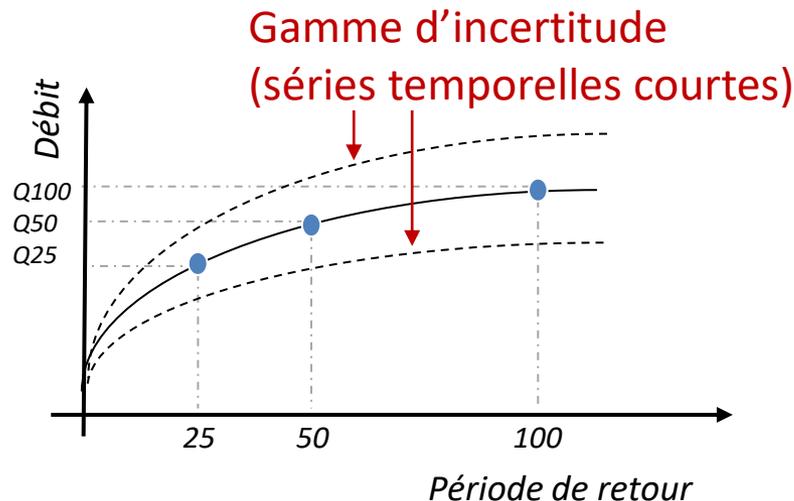
Statistiques

Extrêmes hydrologiques

L'estimation de la fréquence des crues se base sur une analyse statistique

La référence la plus courante pour le risque inondations est la **crue de période de retour de 100 ans**.

Il s'agit du niveau d'inondation ou du pic de débit qui a **1 % de chance d'être égalé ou dépassé chaque année**.



De manière similaire, la crue de période de retour 200 ans a 1/200 (ou 0,5) % de chance d'être égalée ou dépassée chaque année.

Extrêmes hydrologiques

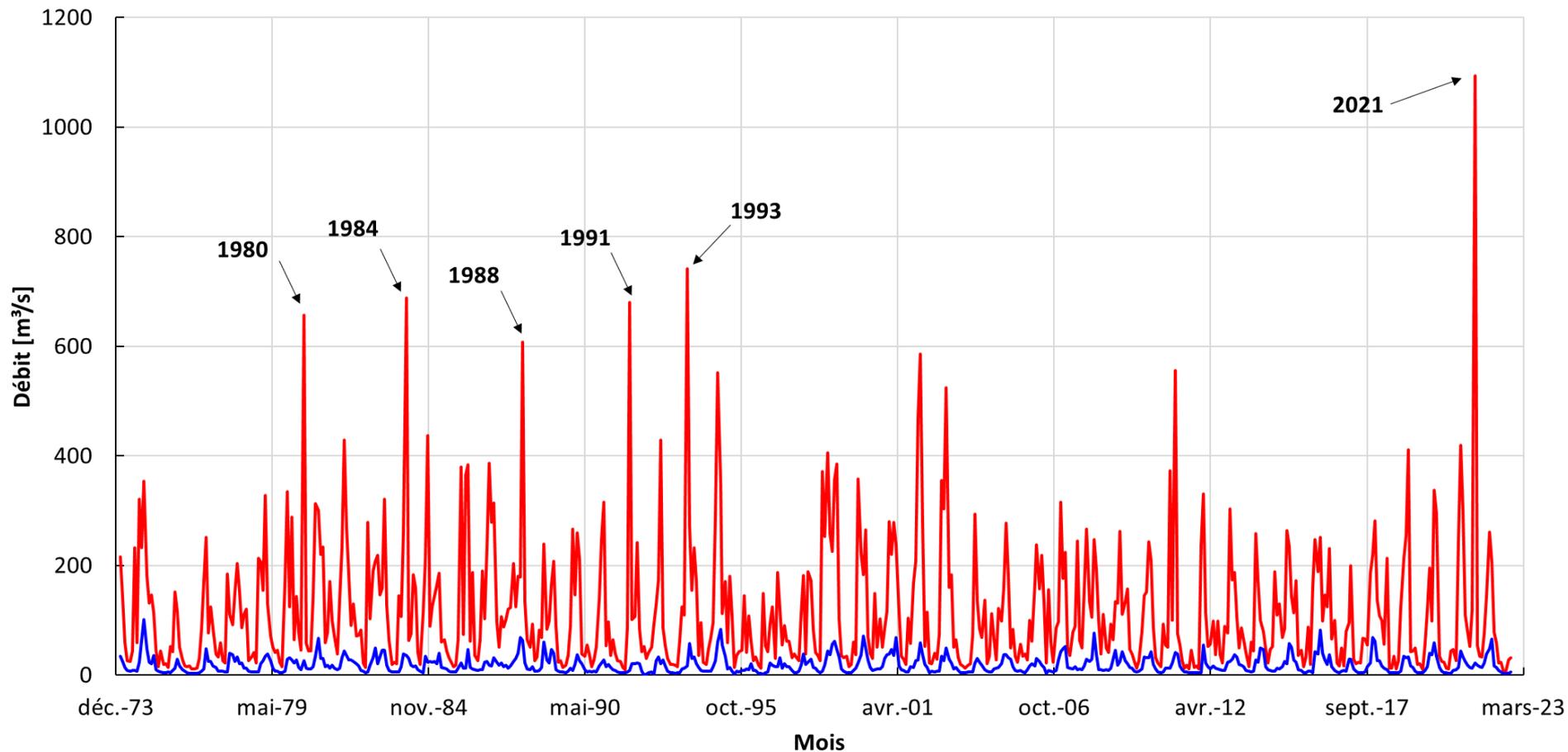
Probabilité de vivre une crue donnée une ou plusieurs fois dans sa vie

Chance of a flood of a particular size being exceeded in any one year	Chance of experiencing a flood in a 70 year period	
	<i>at least once</i>	<i>at least twice</i>
10% (1 in 10 odds)	99.9%	99.3%
5% (1 in 20 odds)	97.0%	86.4%
2% (1 in 50 odds)	75.3%	40.8%
1% (1 in 100 odds)	50.3%	15.6%
0.5% (1 in 200 odds)	29.5%	4.9%

Table 3. Probabilities of experiencing a given size flood once or more in a lifetime. Modified from *Floodplain Development Manual: the management of flood liable land*, NSW Government, 2005.

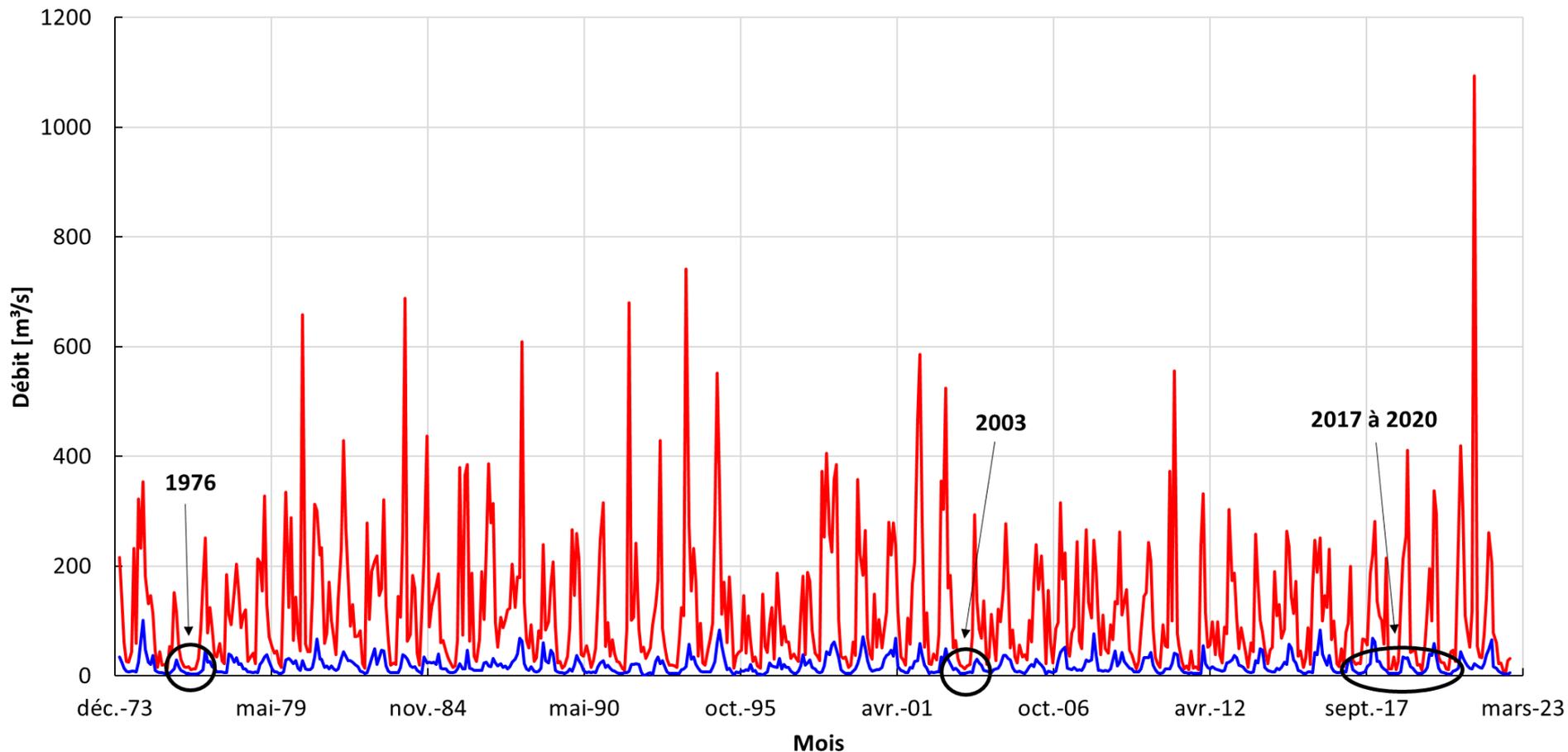
Extrêmes hydrologiques

Débits min et max à Sauheid sur l'Ourthe (Source: SPW - <https://hydrometrie.wallonie.be/>)



Extrêmes hydrologiques

Débits min et max à Sauheid sur l'Ourthe (Source: SPW - <https://hydrometrie.wallonie.be/>)



Cartographie de l'aléa d'inondation

Convertir les débits en emprise d'inondation, hauteurs d'eau et vitesse d'écoulement → modélisation hydraulique

Modèle 2D physiquement basé (Modèle Wolf2D) :



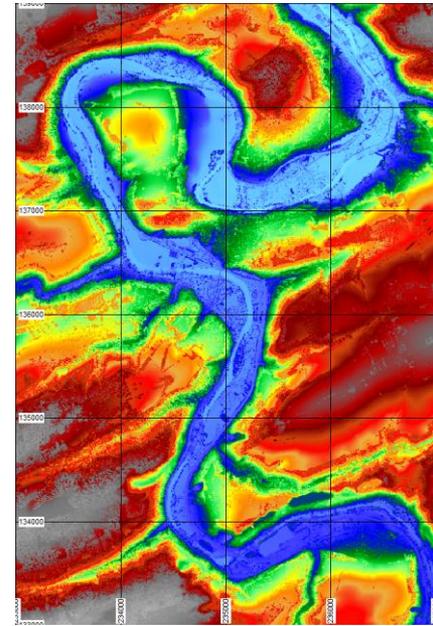
- Au départ d'un modèle numérique de terrain
- Résolution des équations qui représentent les principes physiques de base de conservation de la masse et de la quantité de mouvement → tous les paramètres du modèle ont une signification "physique"
- Afin de connaître la distribution de la hauteur d'eau et des vitesses d'écoulement dans un plan horizontal

Cartographie de l'aléa d'inondation

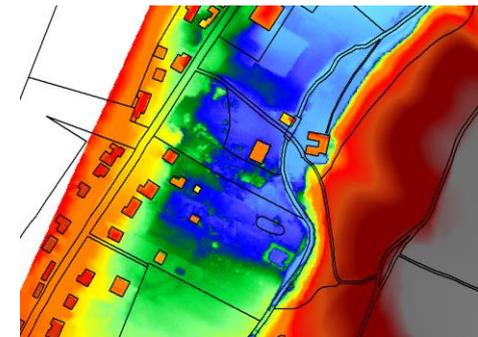
Pré-requis fondamental: disposer d'un modèle numérique de terrain de qualité

→ Exploitation de données du SPW

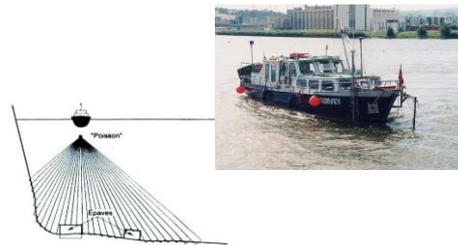
- Lidar
- Bathymétrie sonar
- Sections transversales/Plans terriers
- Levés de terrain complémentaires (géomètres...)
- Limnimètres
- Photos de crues
- PICC
- ...



Source : SPW – Lidar – MNS 2013-2014



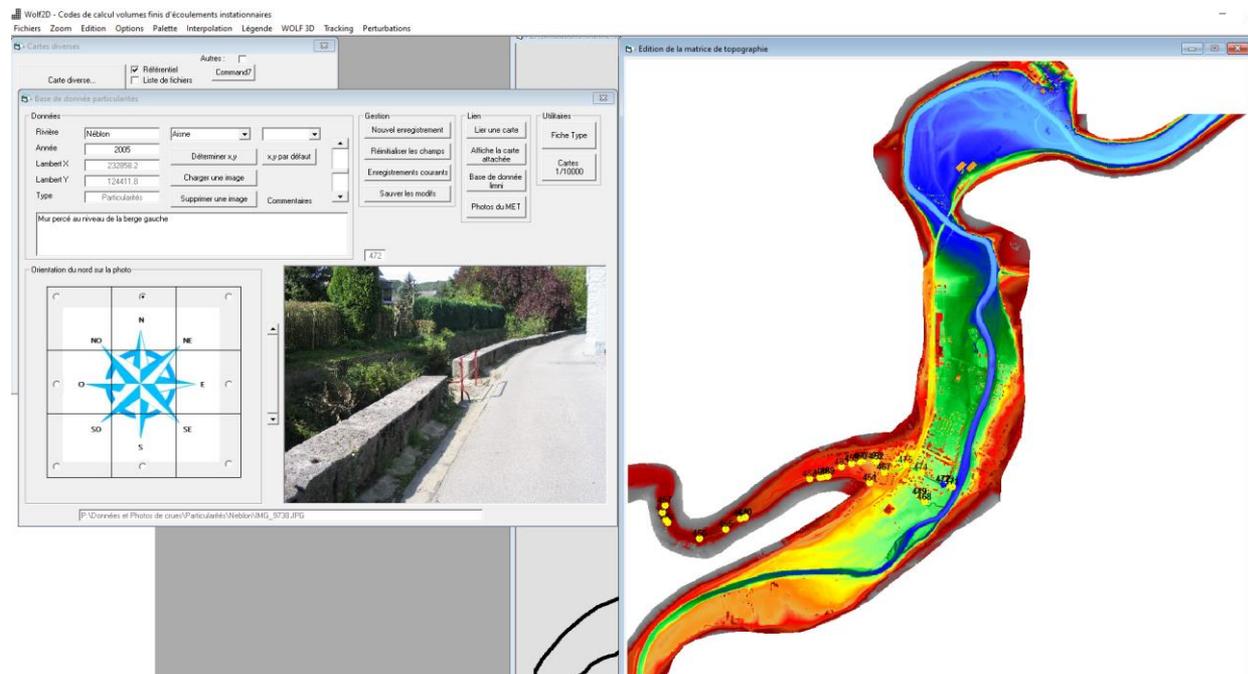
Ex. : trace des bâtiments sur base du PICC



Cartographie de l'aléa d'inondation

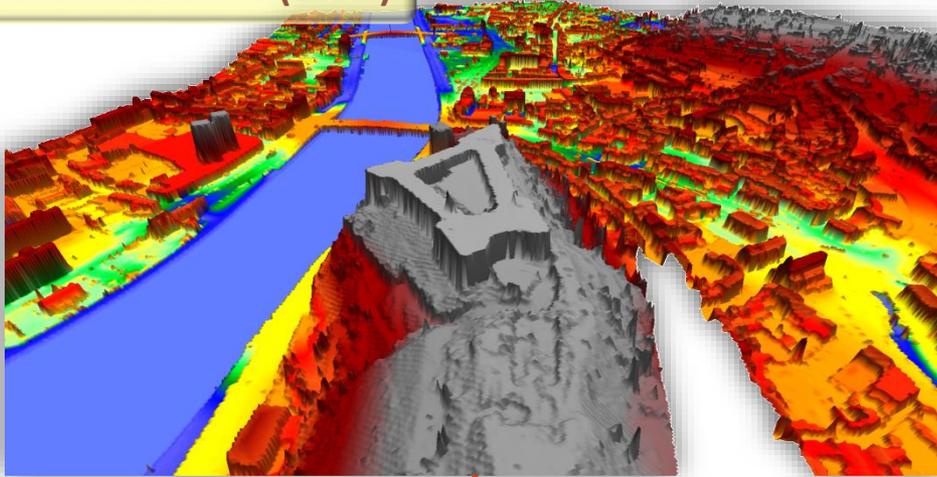
Visite sur site

- Systématique
- Repérage d'éléments
 - Ponctuels
 - Linéaires
- Stockage en BDD
 - Position
 - Valeurs
 - Photos
 - ...



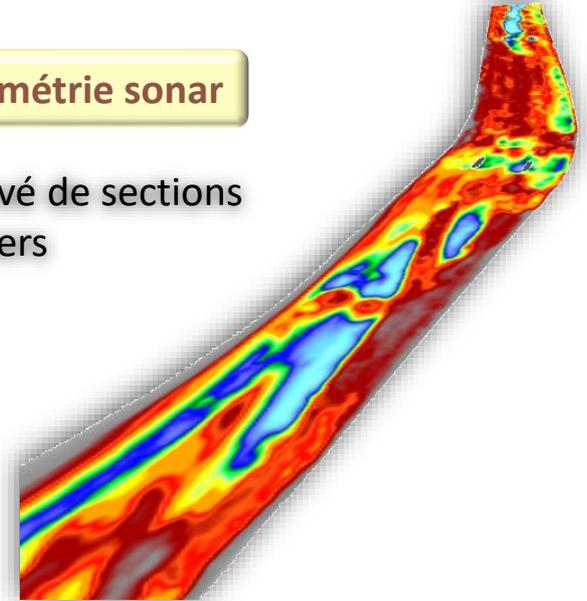
Cartographie de l'aléa d'inondation

Altimétrie laser (Lidar)



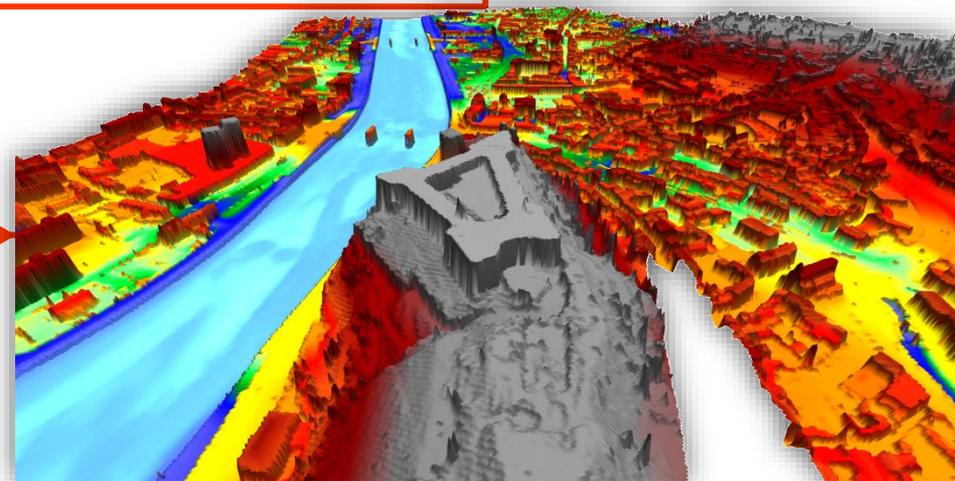
Bathymétrie sonar

ou relevé de sections en travers



+ corrections / améliorations sur base de données de terrain

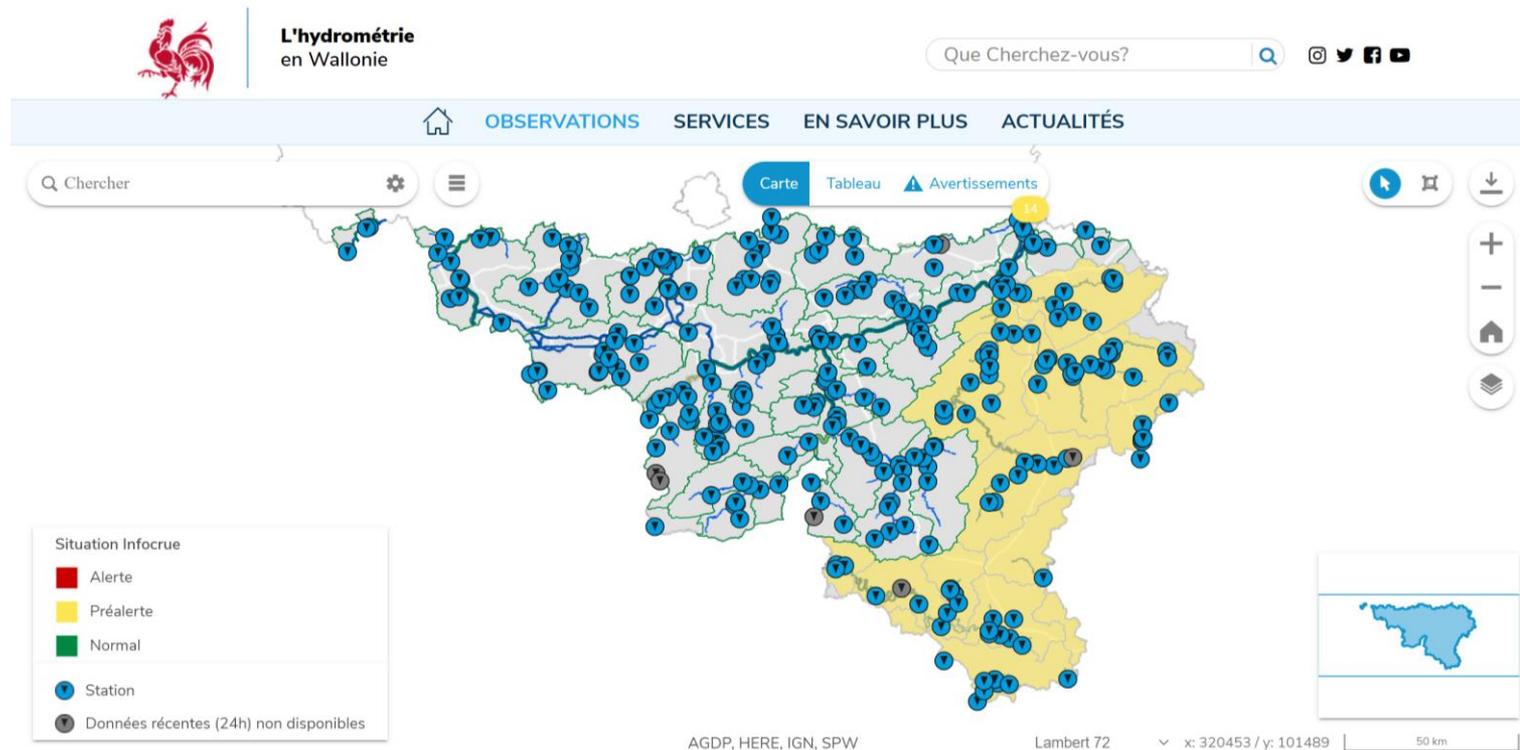
► **Modèle numérique de terrain complet**



Cartographie de l'aléa d'inondation

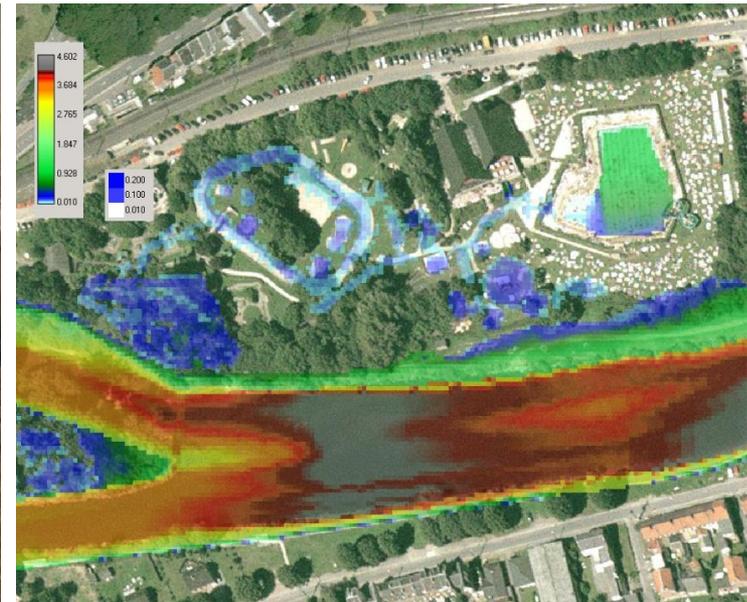
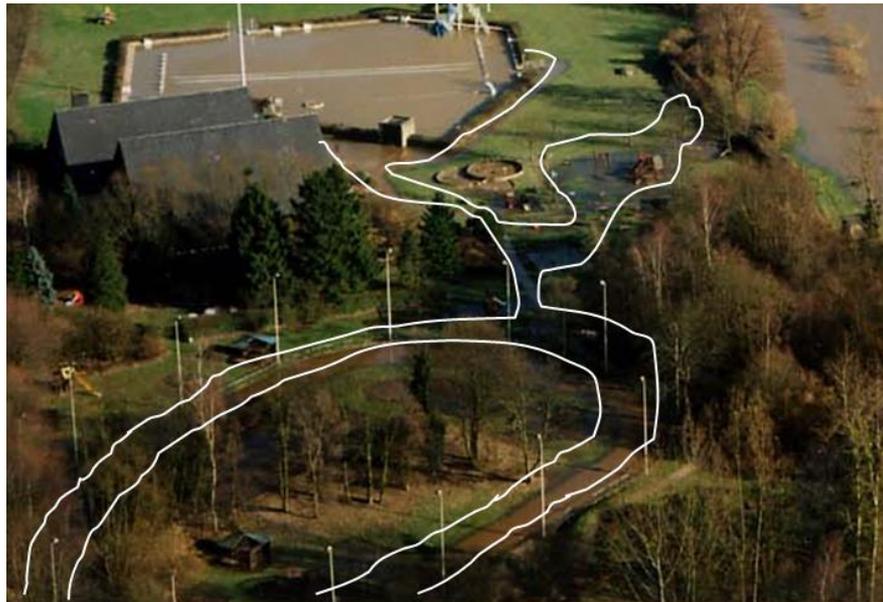
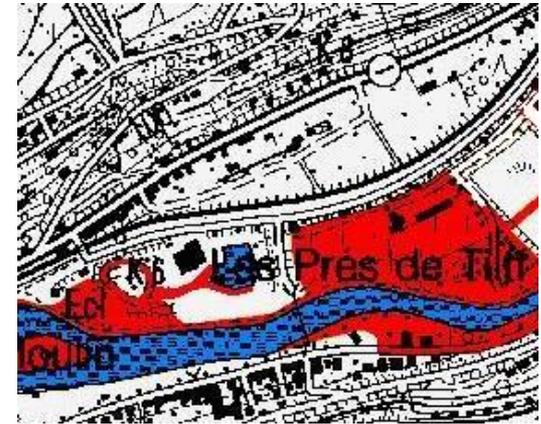
Conditions aux limites

- Sections d'écoulement spécifique (« critiques ») / stations limnimétriques / mesures historiques
- Report de proche en proche



Cartographie de l'aléa d'inondation

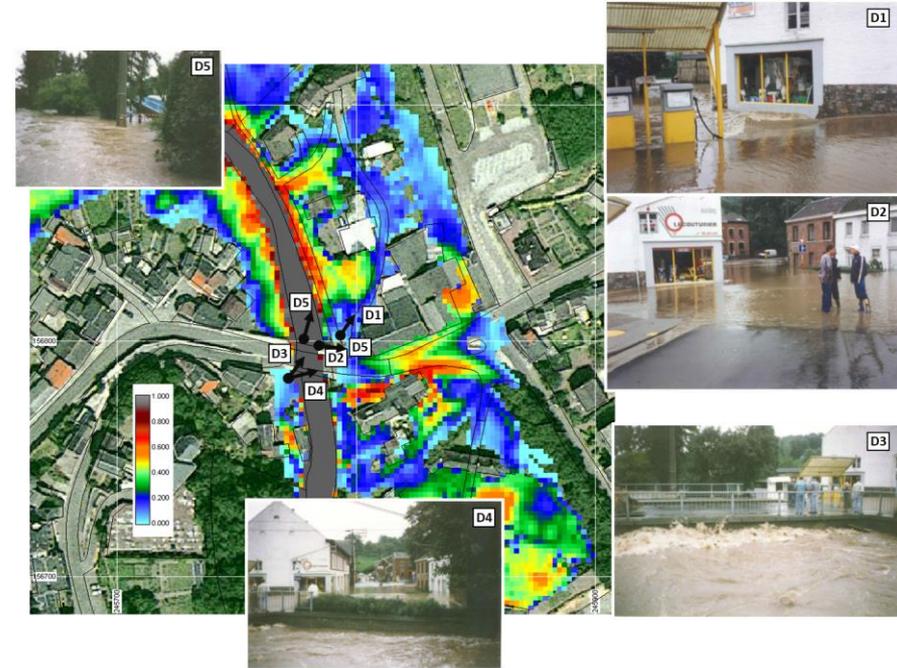
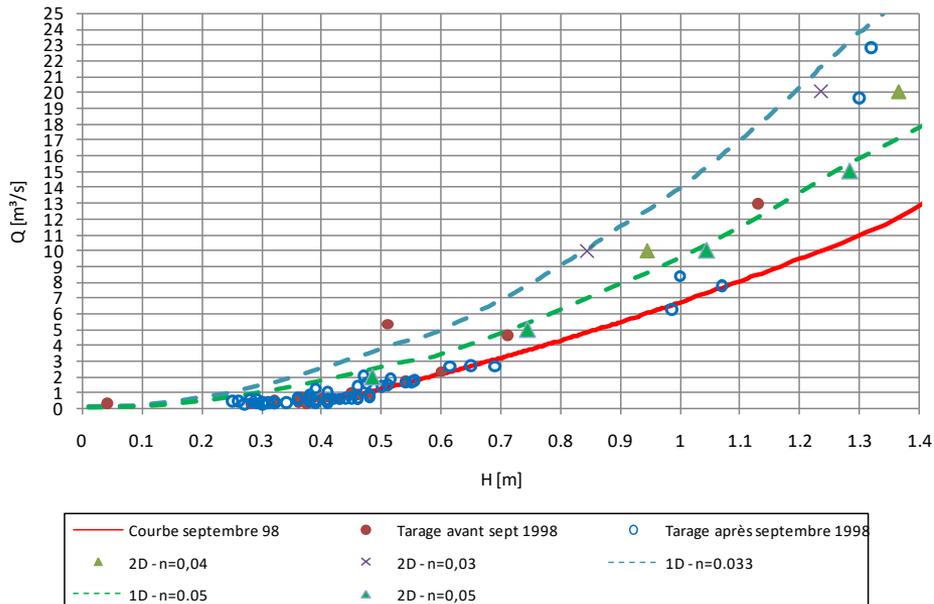
Calage / validation sur base de l'historique



Ourthe – Prés de Tilff

Cartographie de l'aléa d'inondation

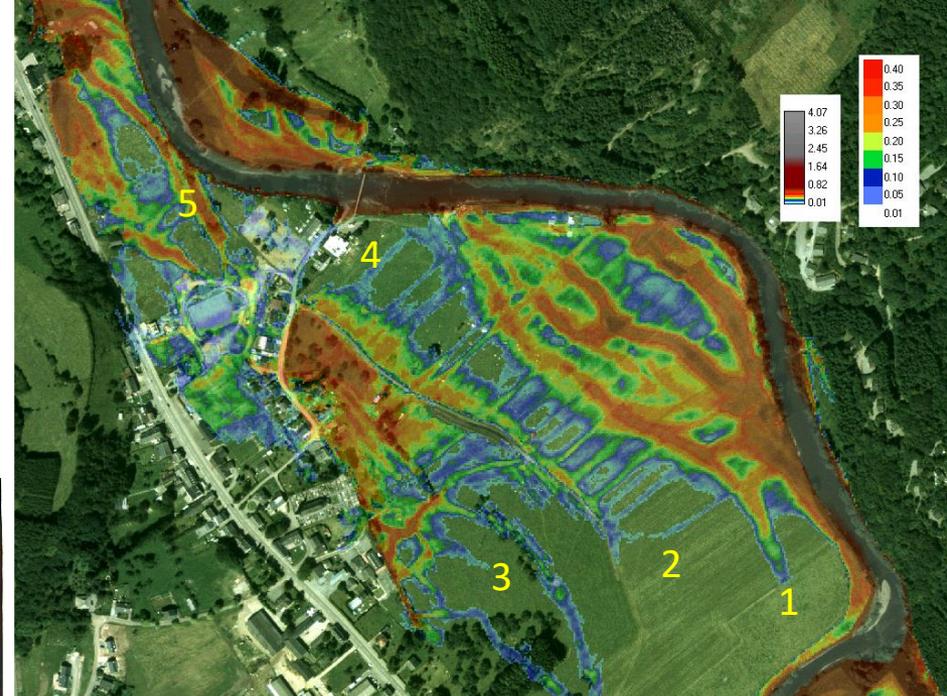
Calage / validation sur base de l'historique



Dalhem - Boland-Berwinne

Cartographie de l'aléa

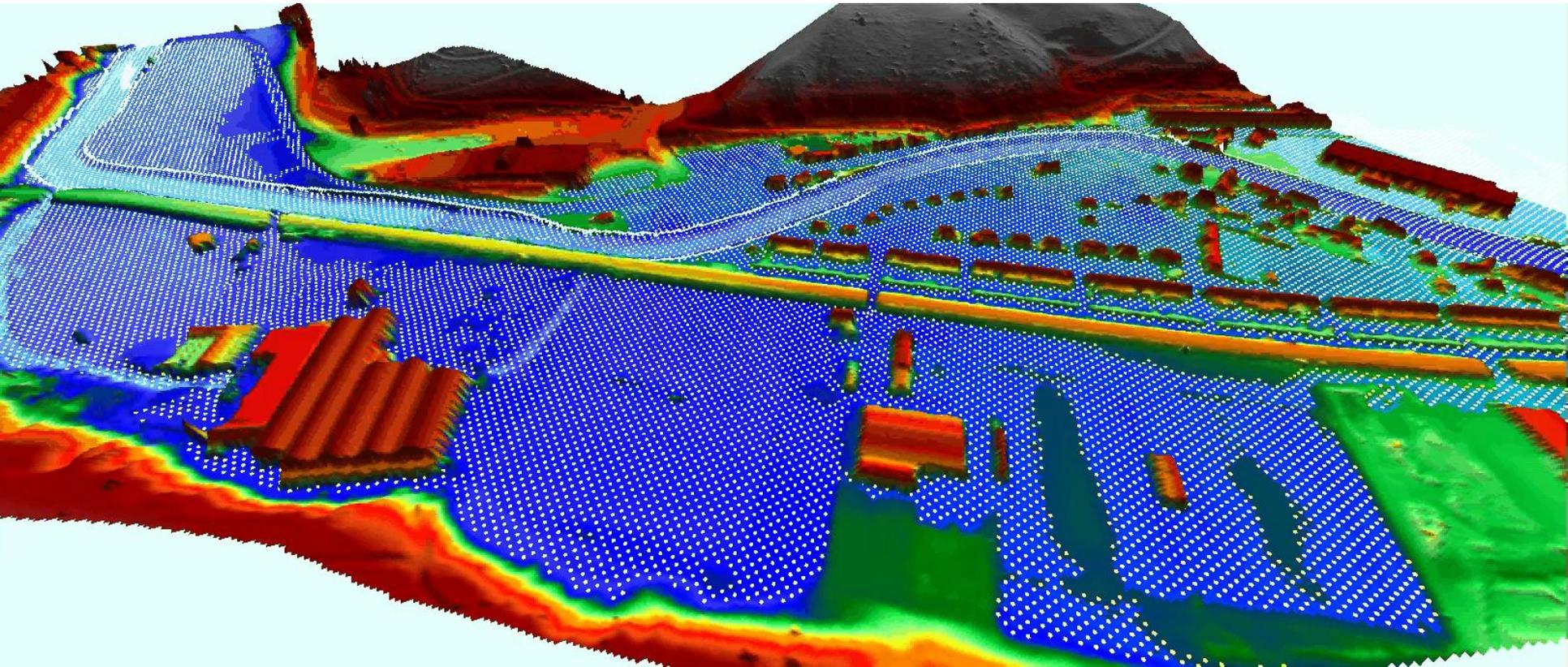
Calage / validation sur base de l'historique



Crue de février 2002 à Rendeux-Bas
(Ourthe) – 165 m³/s

Cartographie de l'aléa d'inondation

Modélisation hydraulique

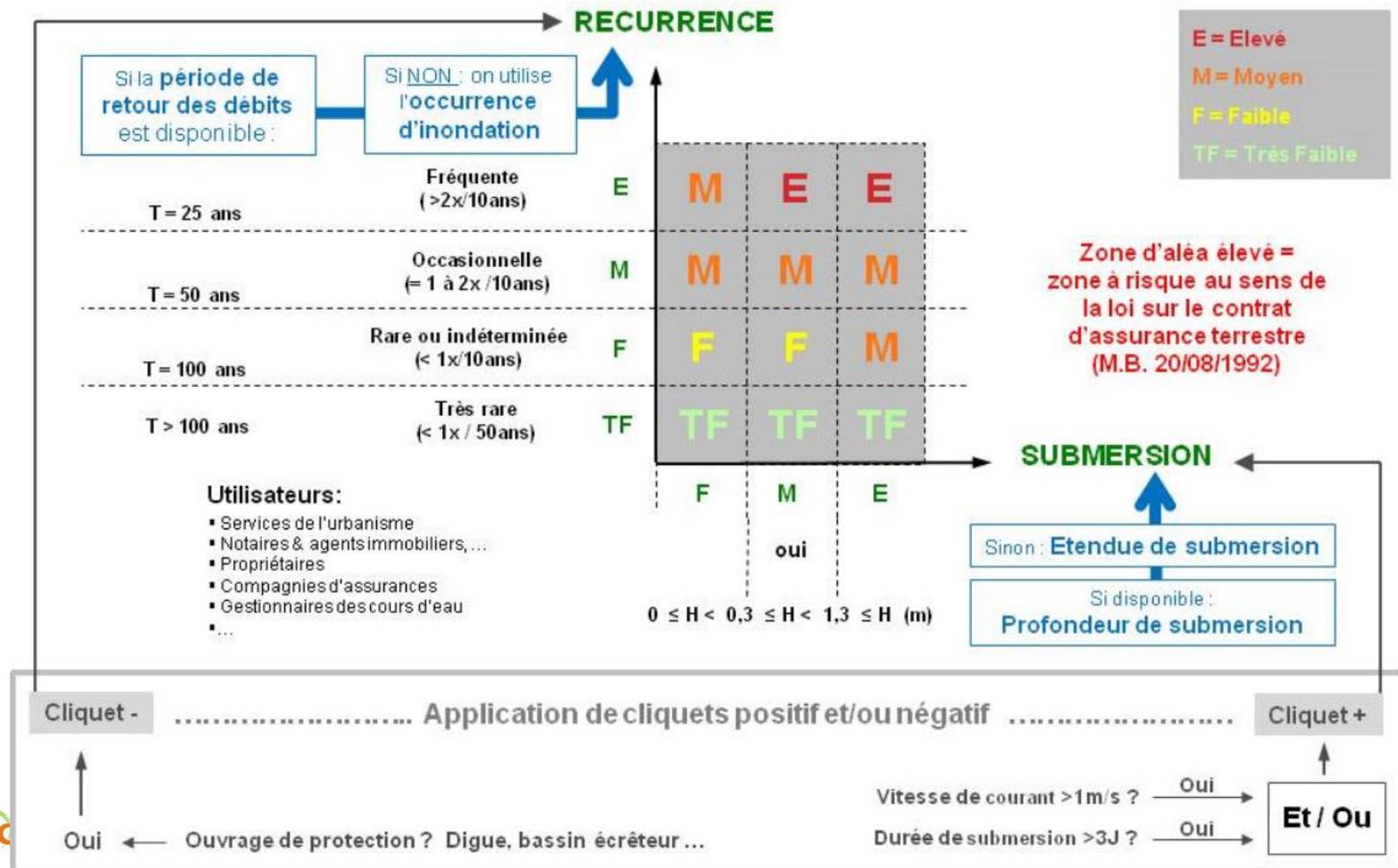


Cartographie du risque inondation



Aléa d'inondation par débordement

Grille de détermination



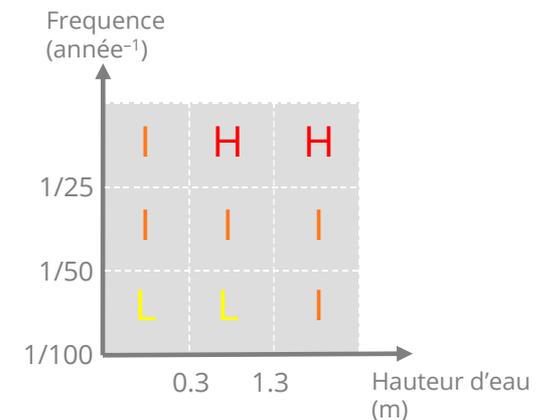
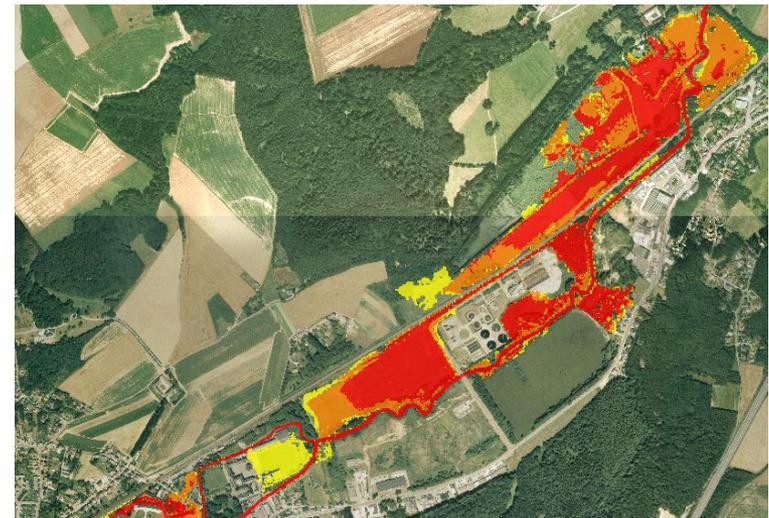
Cartographie du risque inondation

Conditions d'inondation pour différentes périodes de retour

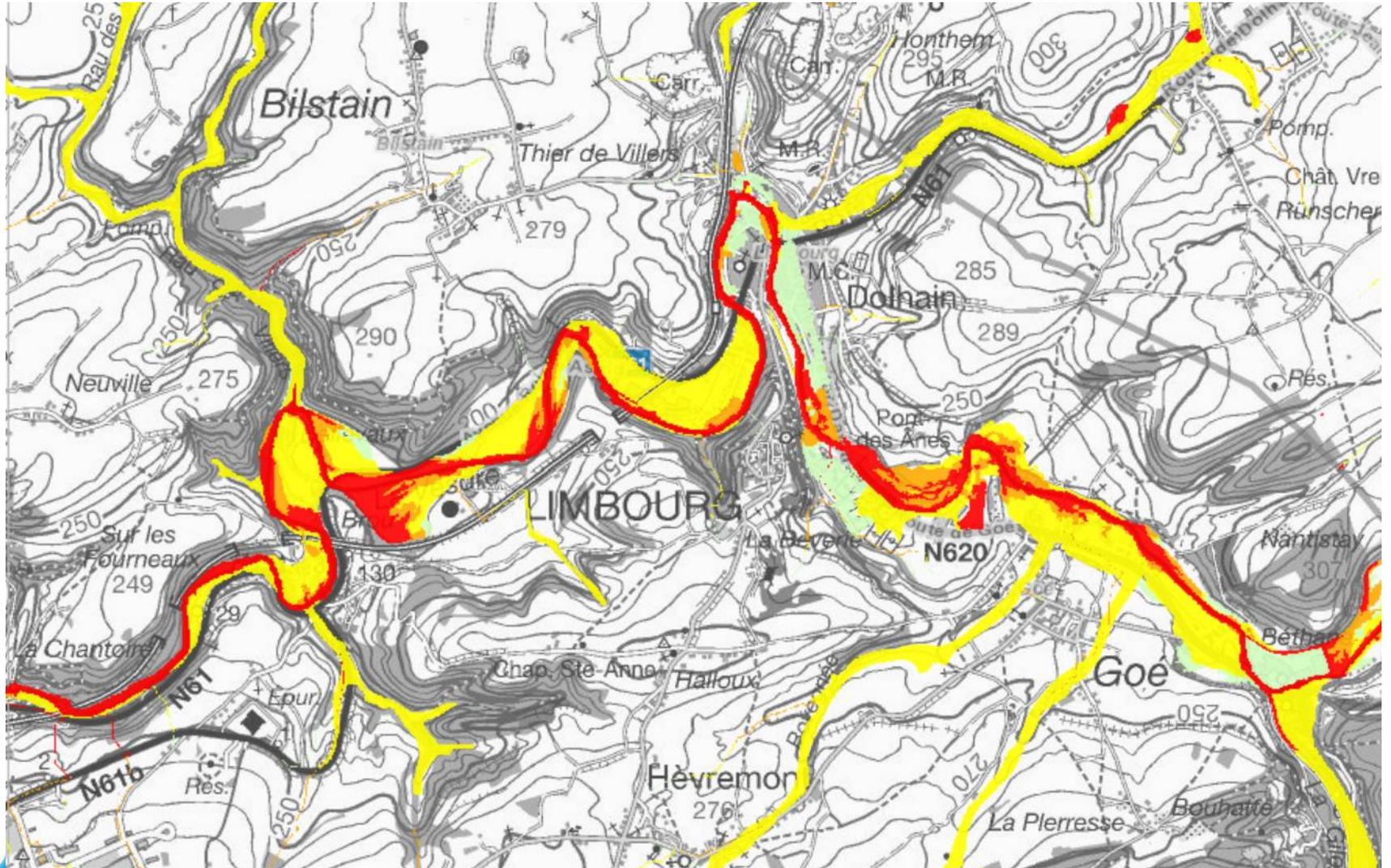


Événement historique
Crue de fréquence $\geq 1/25$
Crue de fréquence $\geq 1/50$
Crue de fréquence $\geq 1/100$

Carte de risque

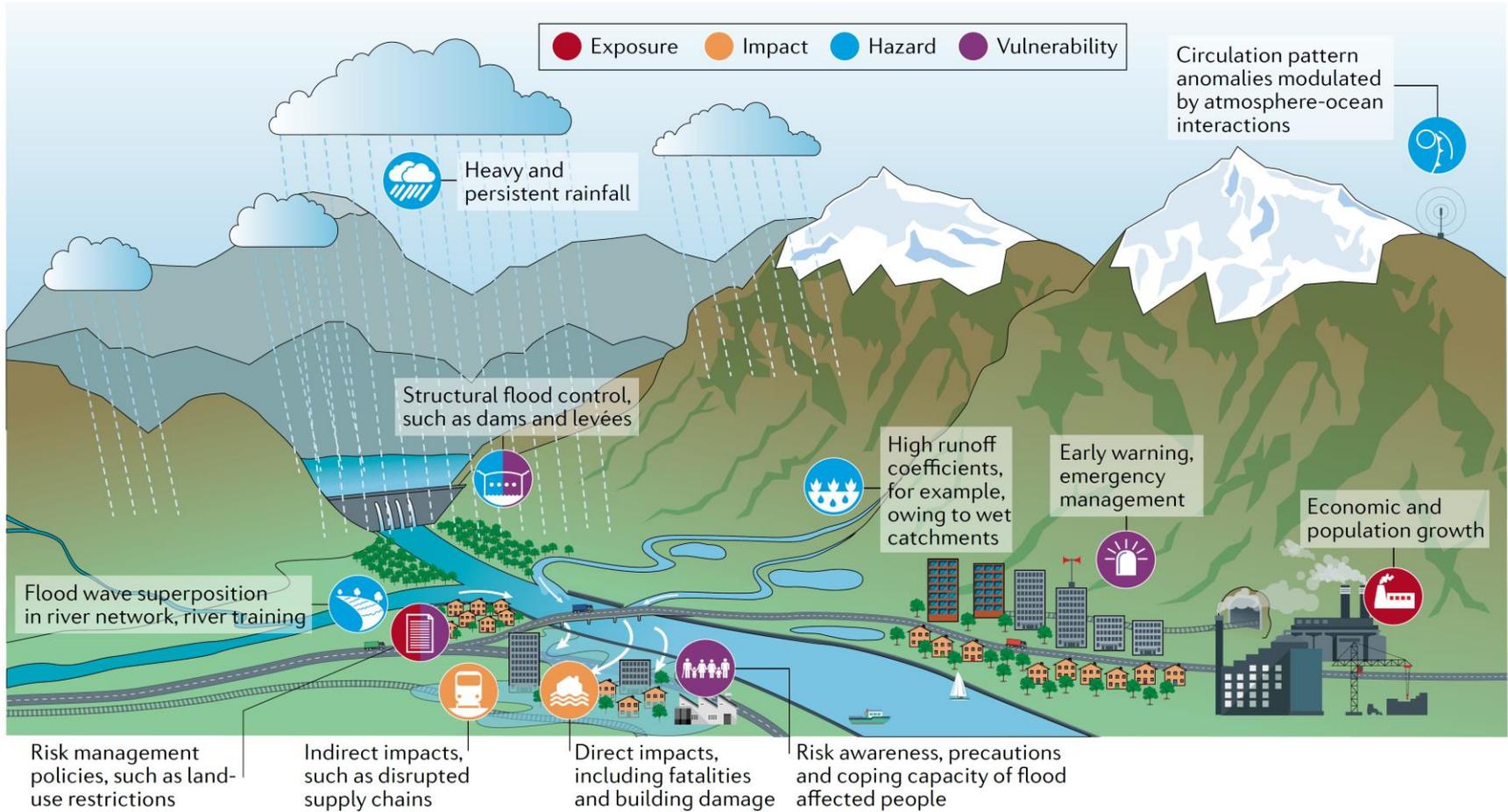


Cartographie du risque inondation



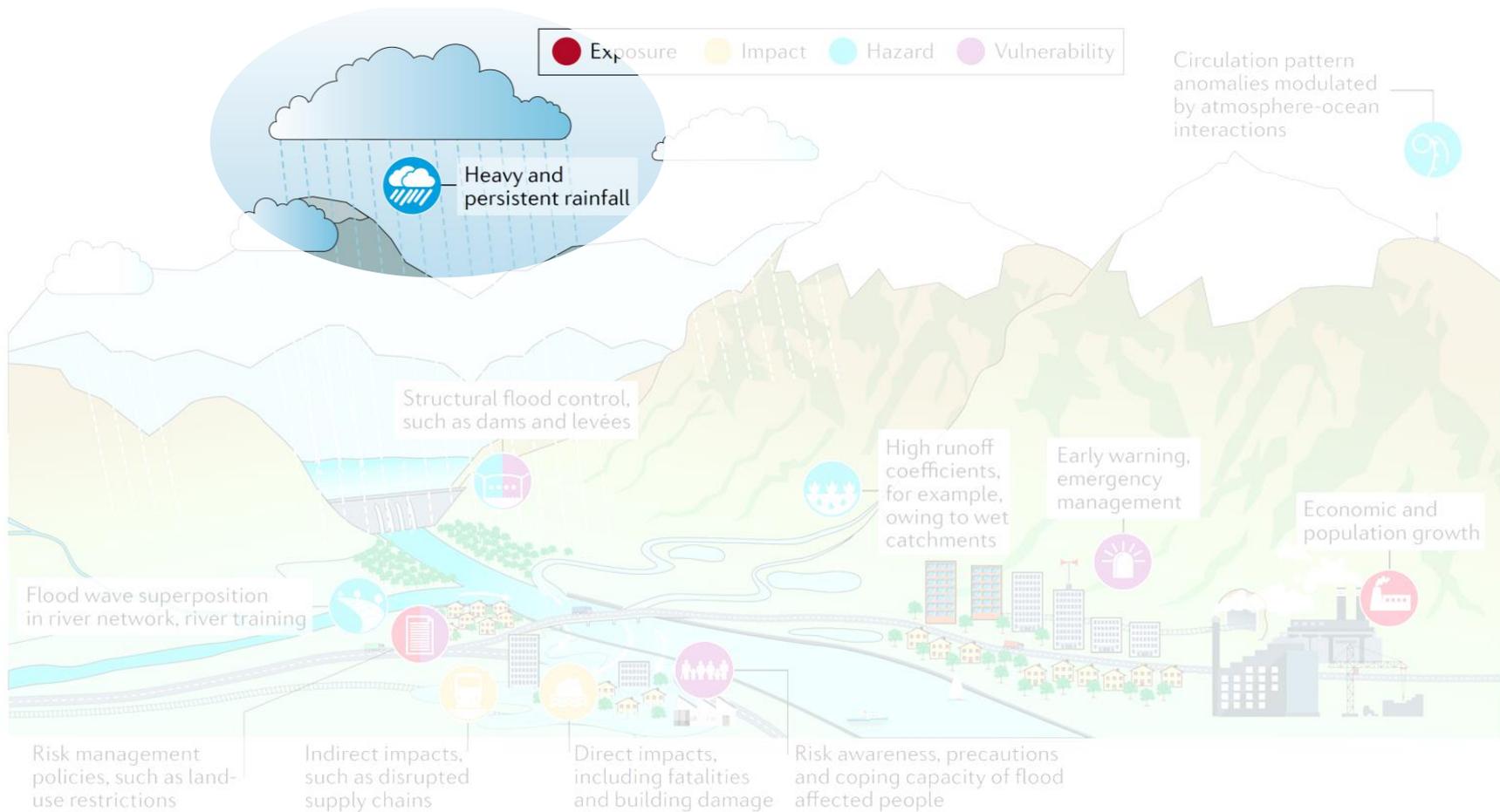
(source: SPW - WalOnMap)

Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation



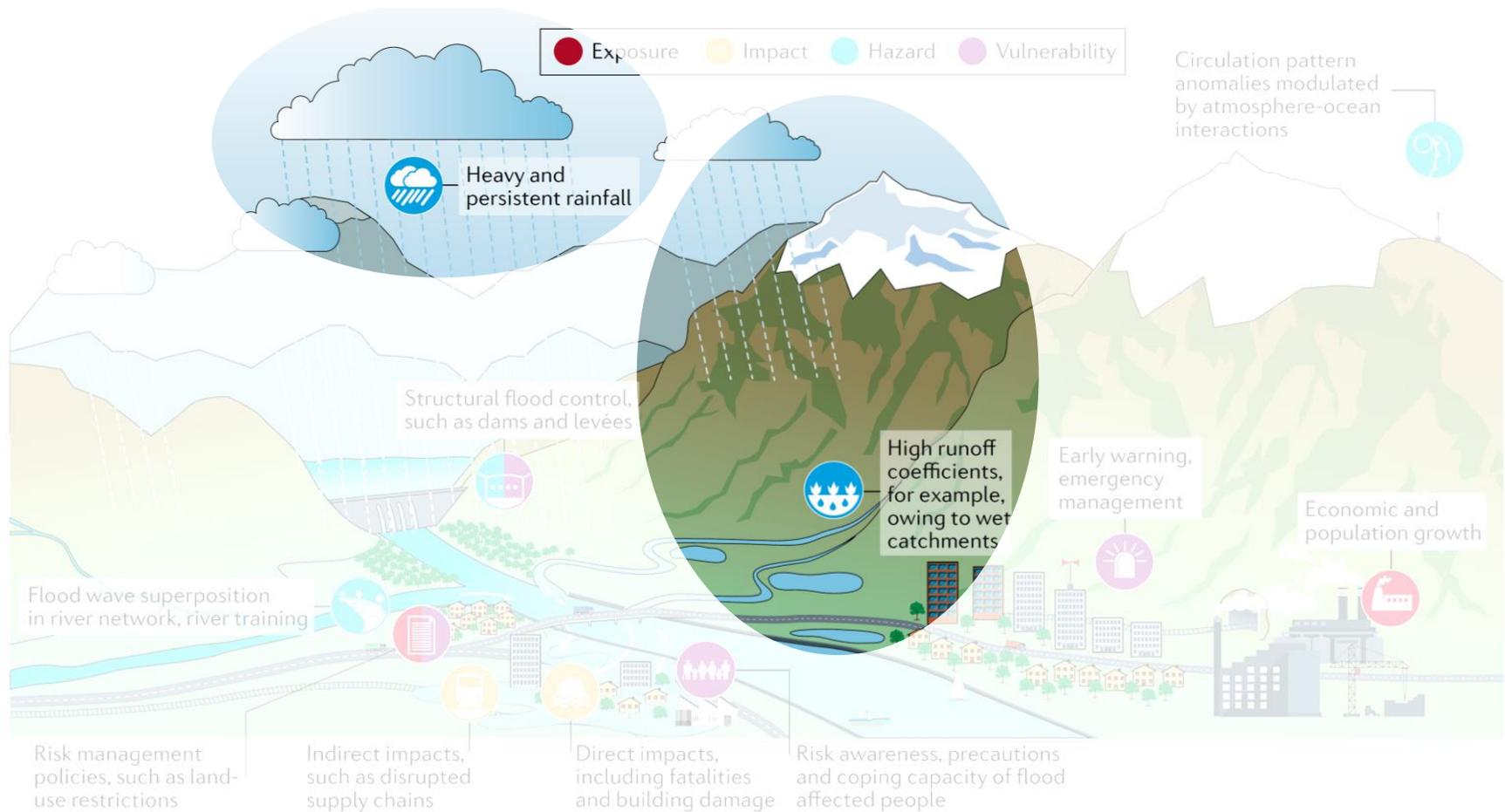
Merz et al. (2021)

Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation



Merz et al. (2021)

Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation



Merz et al. (2021)

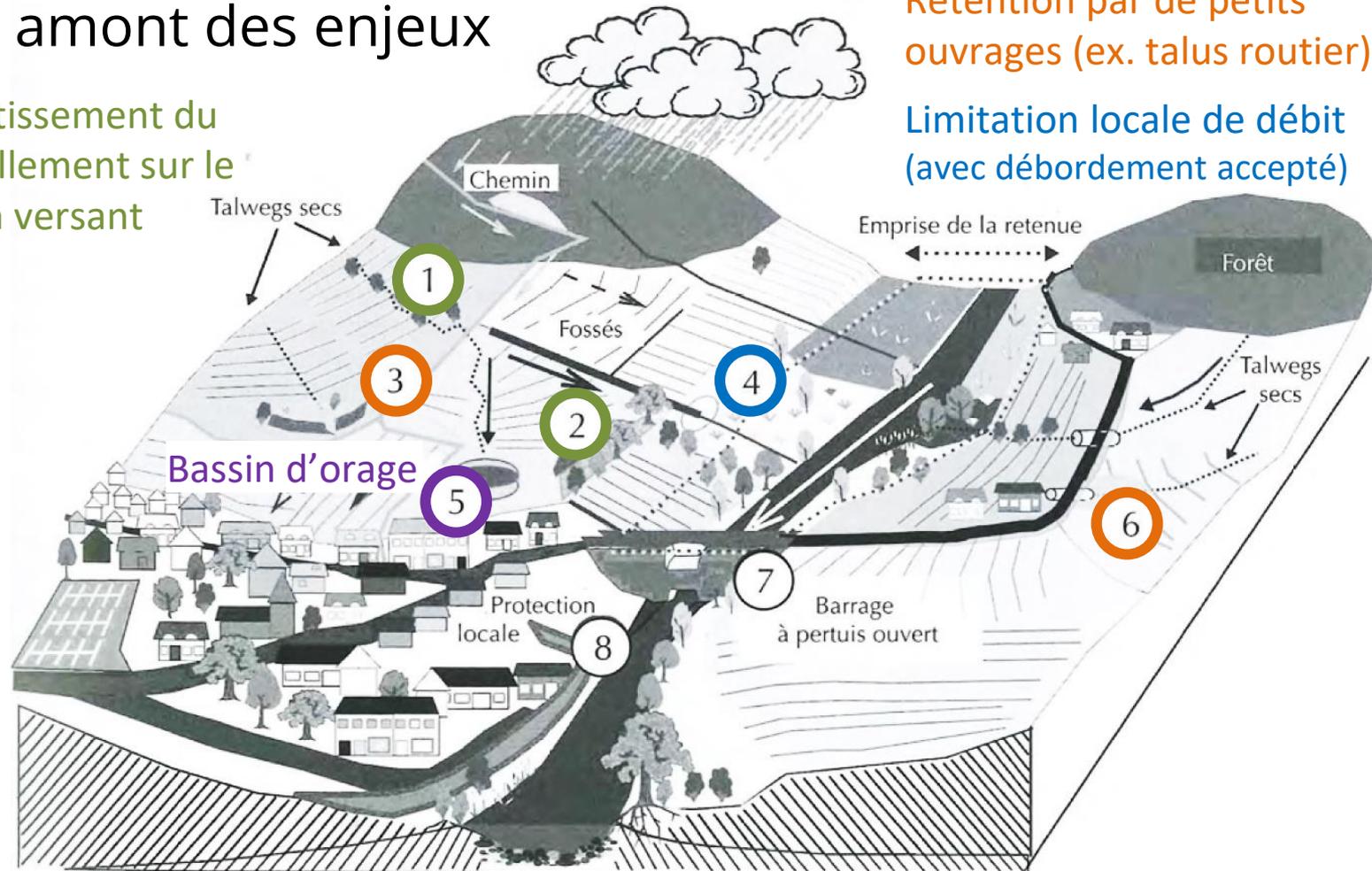
Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation

Ralentissement dynamique : écrêter les crues en amont des enjeux

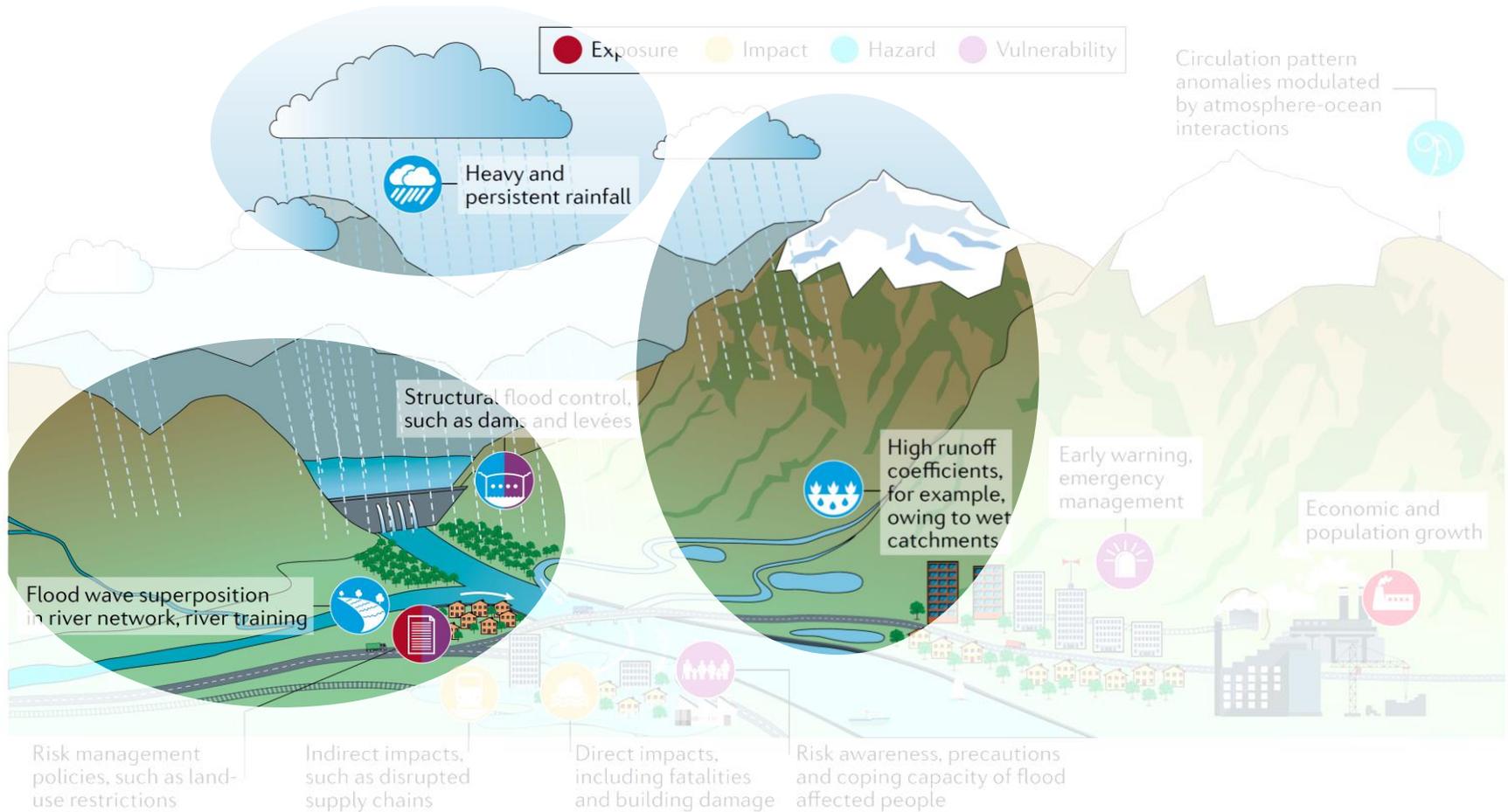
Ralentissement du ruissellement sur le bassin versant

Rétention par de petits ouvrages (ex. talus routier)

Limitation locale de débit (avec débordement accepté)



Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation



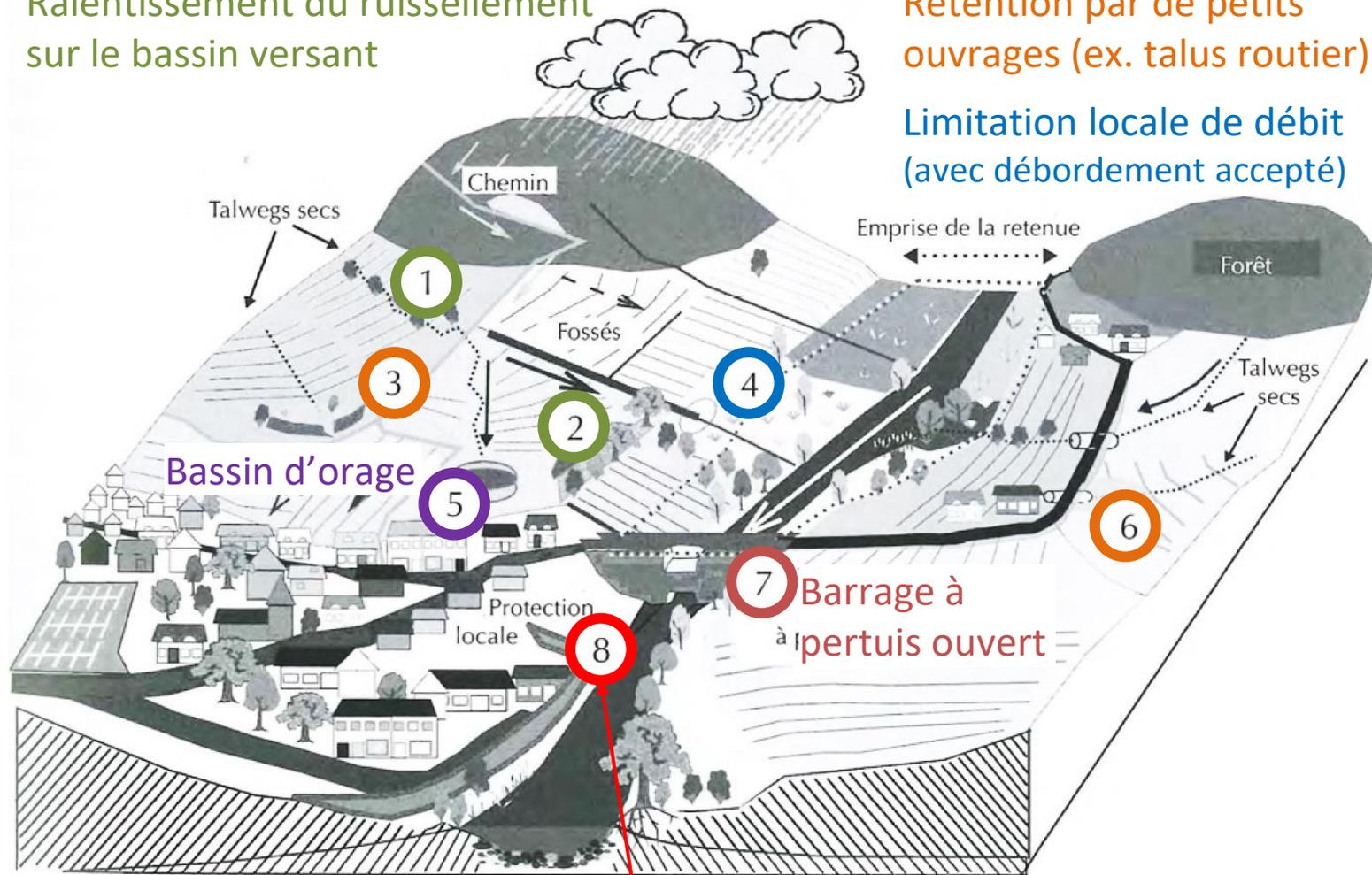
Merz et al. (2021)

Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation

Ralentissement du ruissellement sur le bassin versant

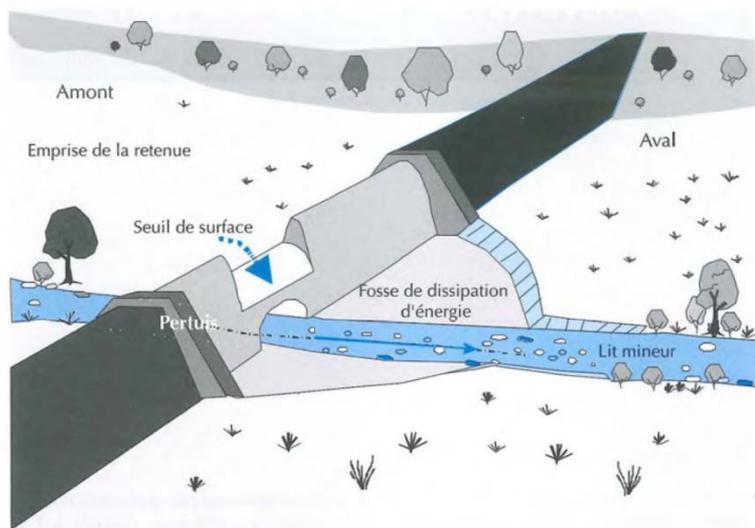
Rétention par de petits ouvrages (ex. talus routier)

Limitation locale de débit (avec débordement accepté)



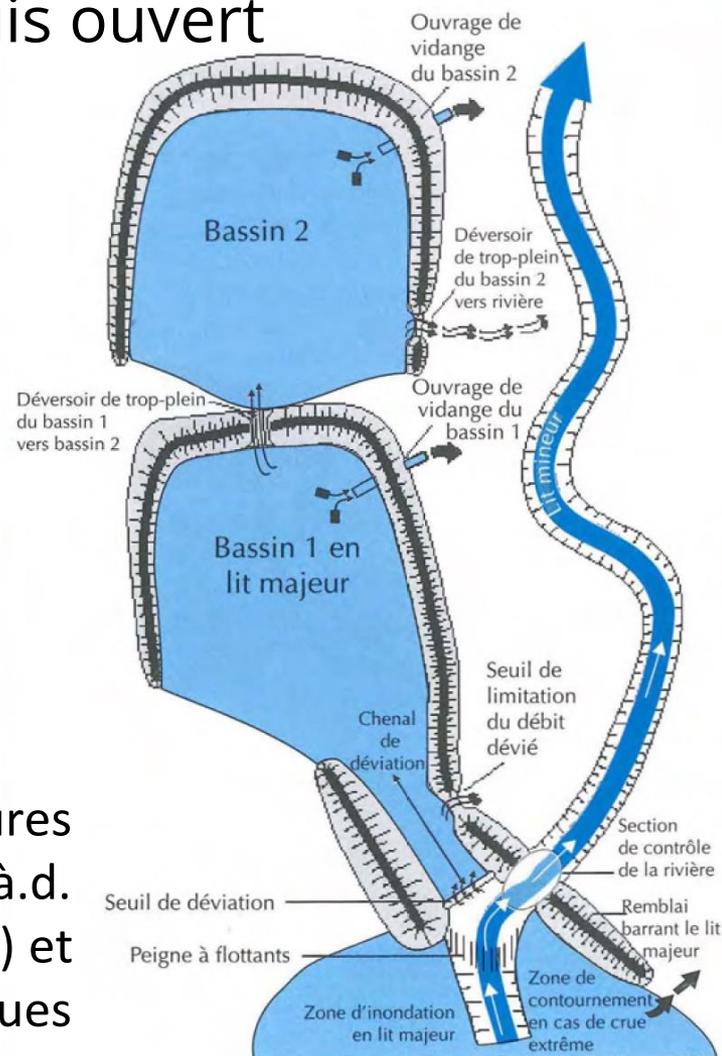
Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation

Types d'ouvrages de ralentissement dynamique : bassins latéraux et barrages à pertuis ouvert



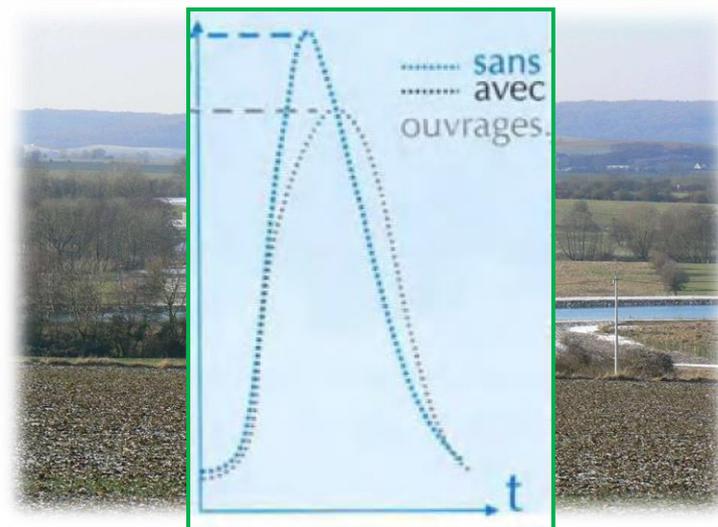
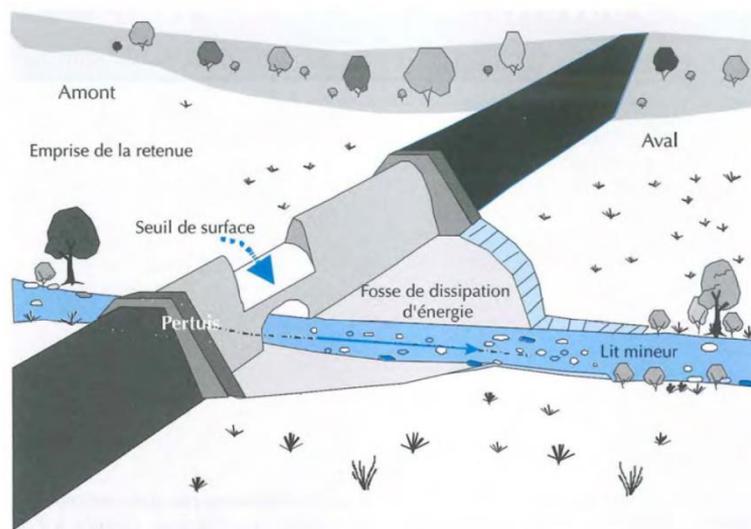
Les **barrages à pertuis ouvert** (= « barrages secs ») sont construits en travers des lits mineur et majeur

Les **bassins latéraux** sont des structures de stockage placées en dérivation (c.à.d. alimentées par déversement latéral) et délimitées par des digues



Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation

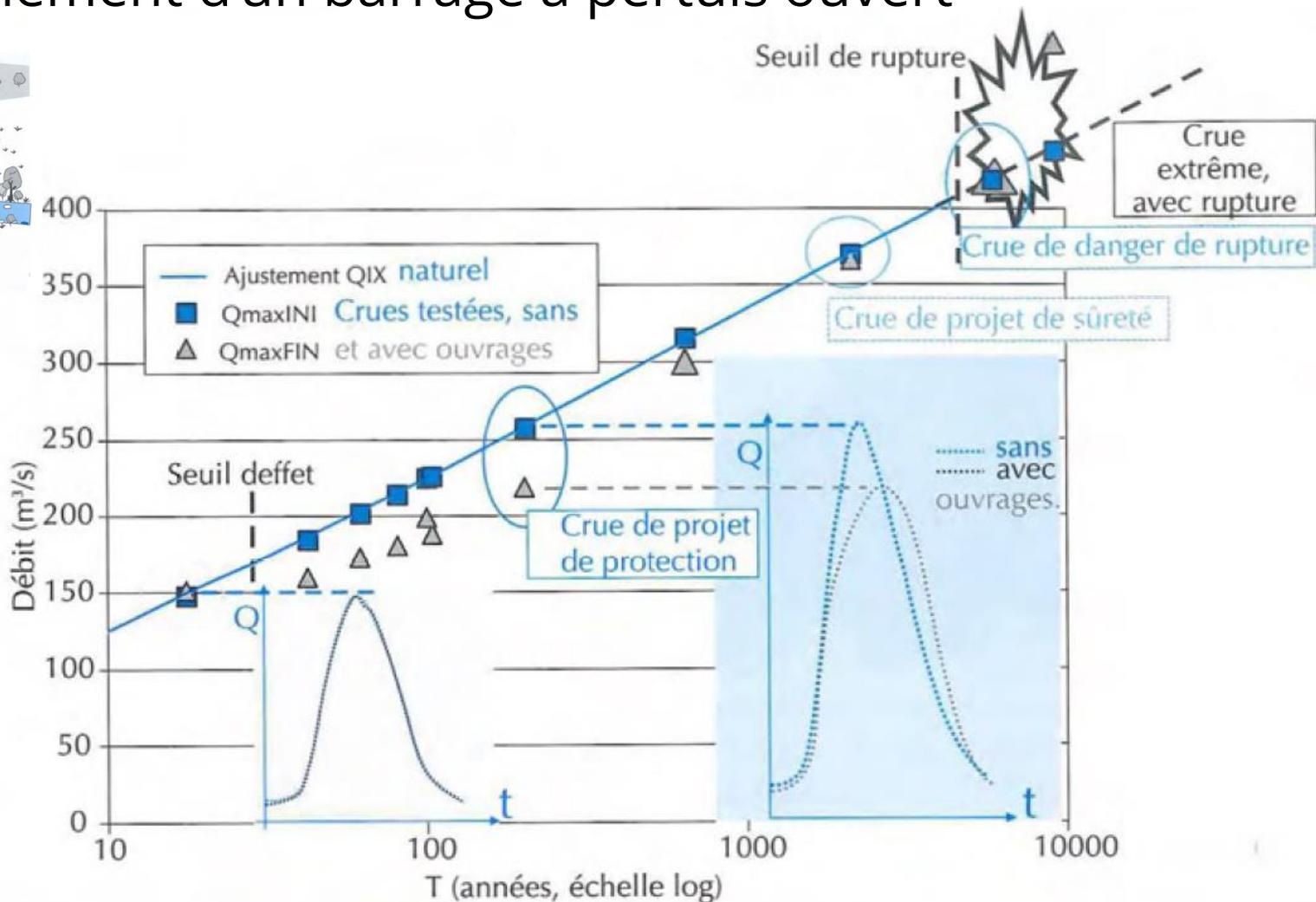
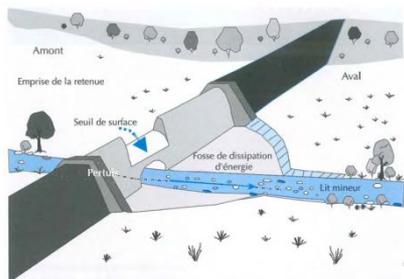
Fonctionnement d'un barrage à pertuis ouvert



Période de retour		de 10 à 50 ans environ	« Crue(s) de protection », crue(s) provoquant un remplissage jusqu'à la cote de protection, en l'occurrence celle du déversoir de surface ; le fonctionnement de l'ouvrage écrêteur de crue est alors optimal.
		de 100 à 10 000 ans selon taille et type d'ouvrage	« Crue(s) de sûreté », crue(s) entrante(s) provoquant un remplissage jusqu'à la cote de sûreté, en l'occurrence celle des plus hautes eaux laissant encore une revanche pour se protéger de l'effet des vagues. La période de retour correspondante doit être fixée en fonction des caractéristiques et des enjeux.
		Extrême	« Crue(s) de danger de rupture », crue(s) entrante(s) associées à la cote de danger de rupture, celle au-delà de laquelle on ne garantit plus la tenue de l'ouvrage (généralement la cote de la crête dans le cas d'un barrage en terre). Nous proposons que la probabilité de dépassement de cette cote soit de l'ordre de dix fois inférieure à celle de la cote de sûreté.

Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation

Fonctionnement d'un barrage à pertuis ouvert



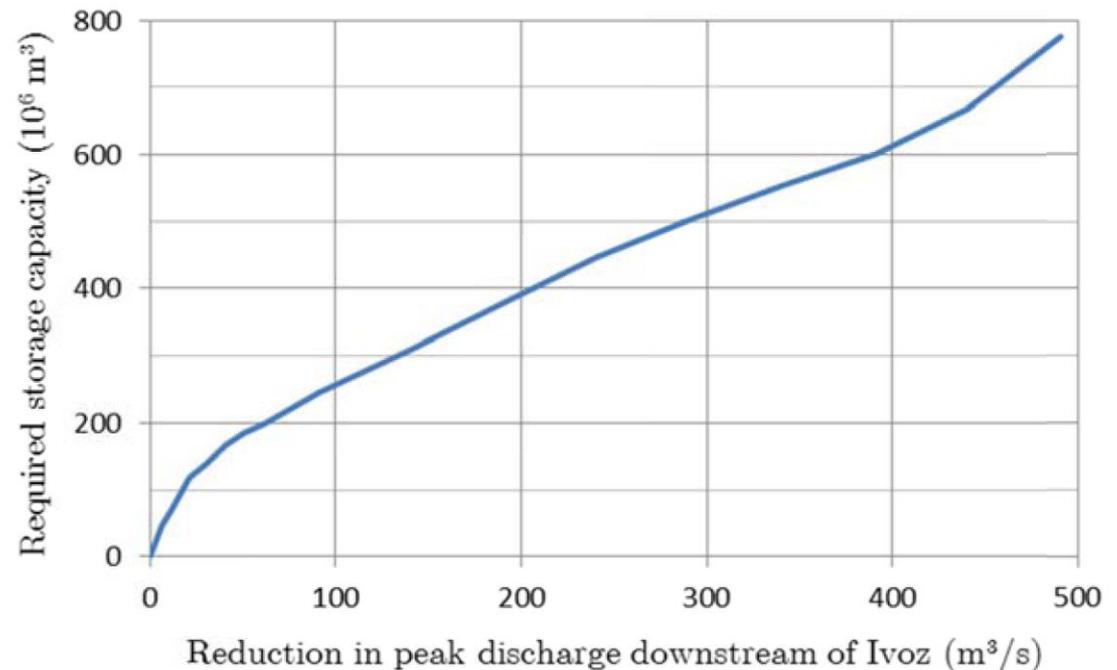
Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation

Le stockage temporaire n'est pas toujours envisageable

Stockage total dans un bief de Meuse $\sim 10^7 \text{ m}^3$

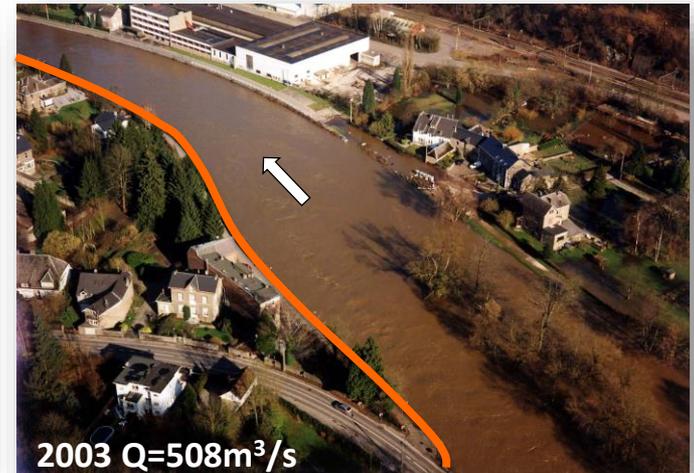
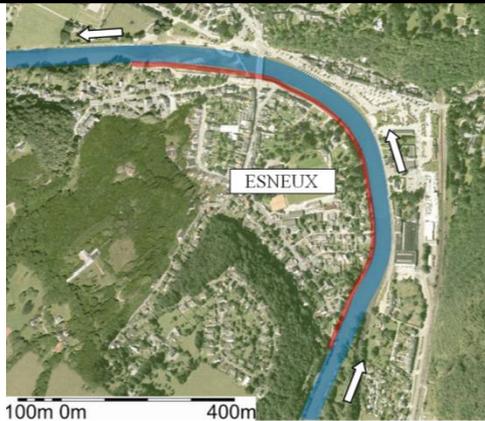
Débit de crue de la Meuse $\sim 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$

Temps de remplissage $\sim 10^4 \text{ s}$ c.à.d. 2-3 h



Les protections, favorables dans une gamme de débit, s'avérer défavorables en dehors

CONSTRUCTION DE MURS ANTI-CRUE



IMPACT HYDRAULIQUE

▶ Pas d'effet pour les crues moyennes

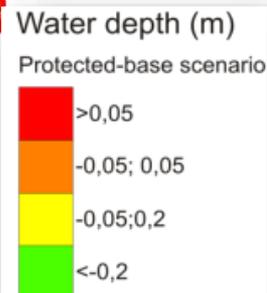
▶ Efficace pour les crues rares

▶ Effets négatifs pour les crues extrêmes

Q = 508 m³/s
(crue de 2003 T ~ 4 ans)

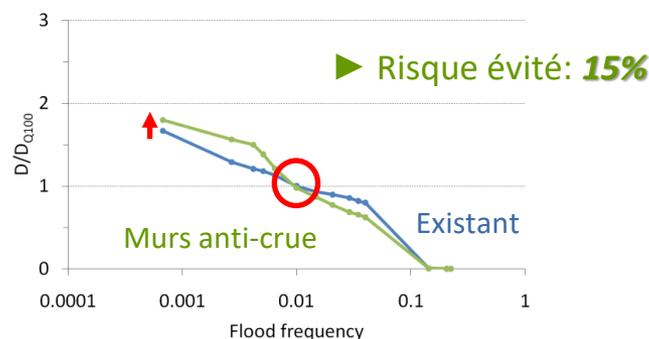
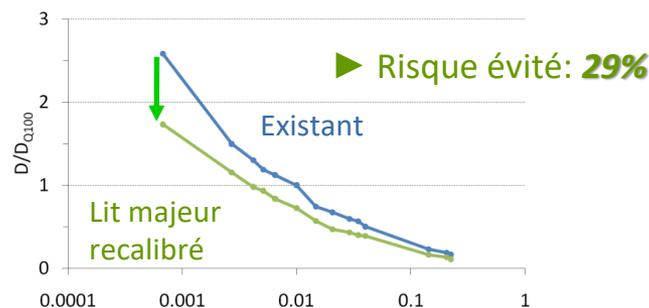
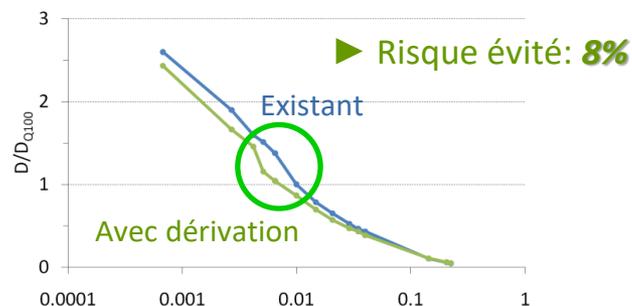
Q = 762 m³/s
(T ~ 34 ans)

Q = 1007 m³/s
(T ~ 300-400 ans)



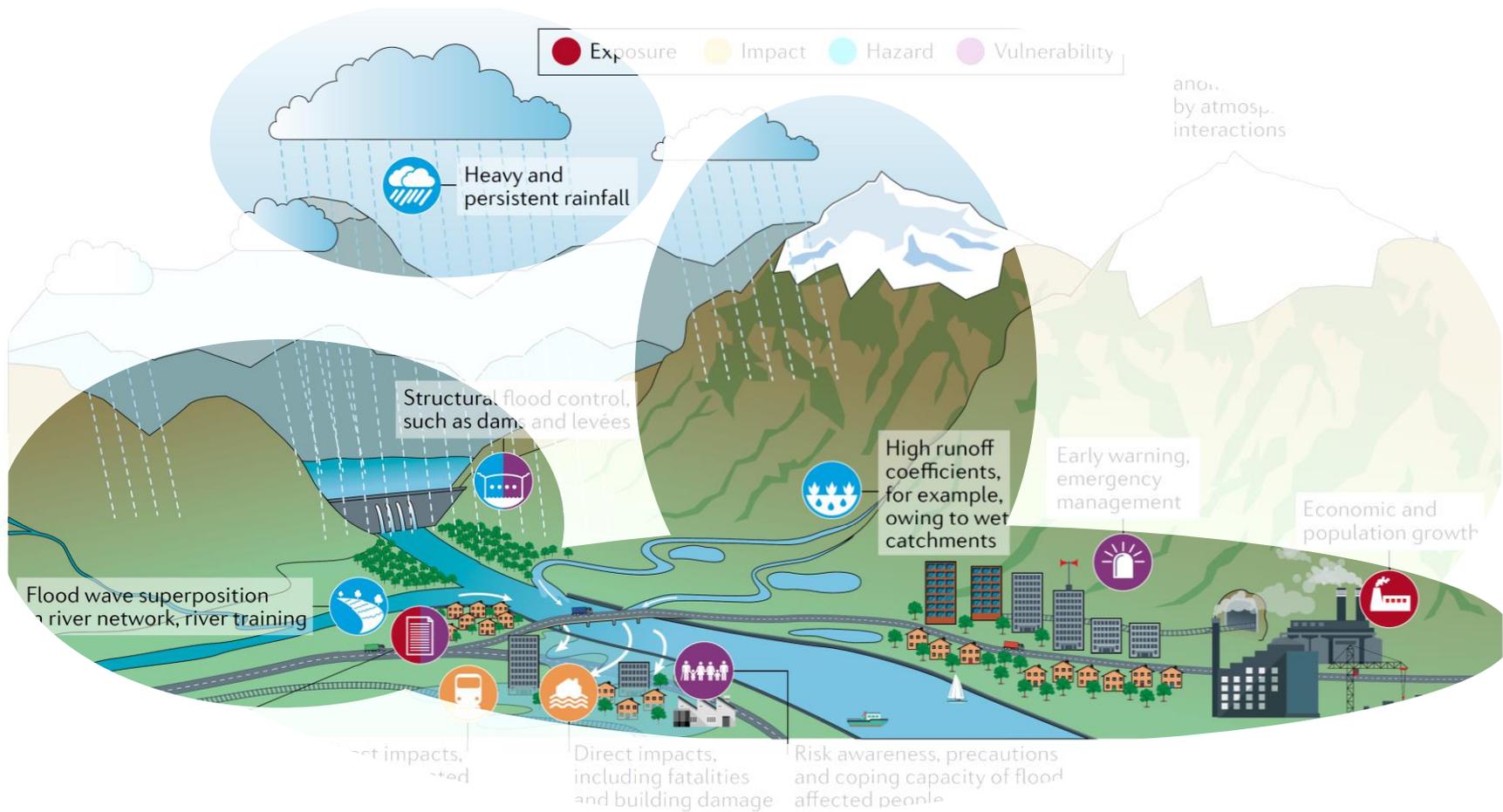
Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation

Les protections, favorables dans une gamme de débit, s'avérer défavorables en dehors



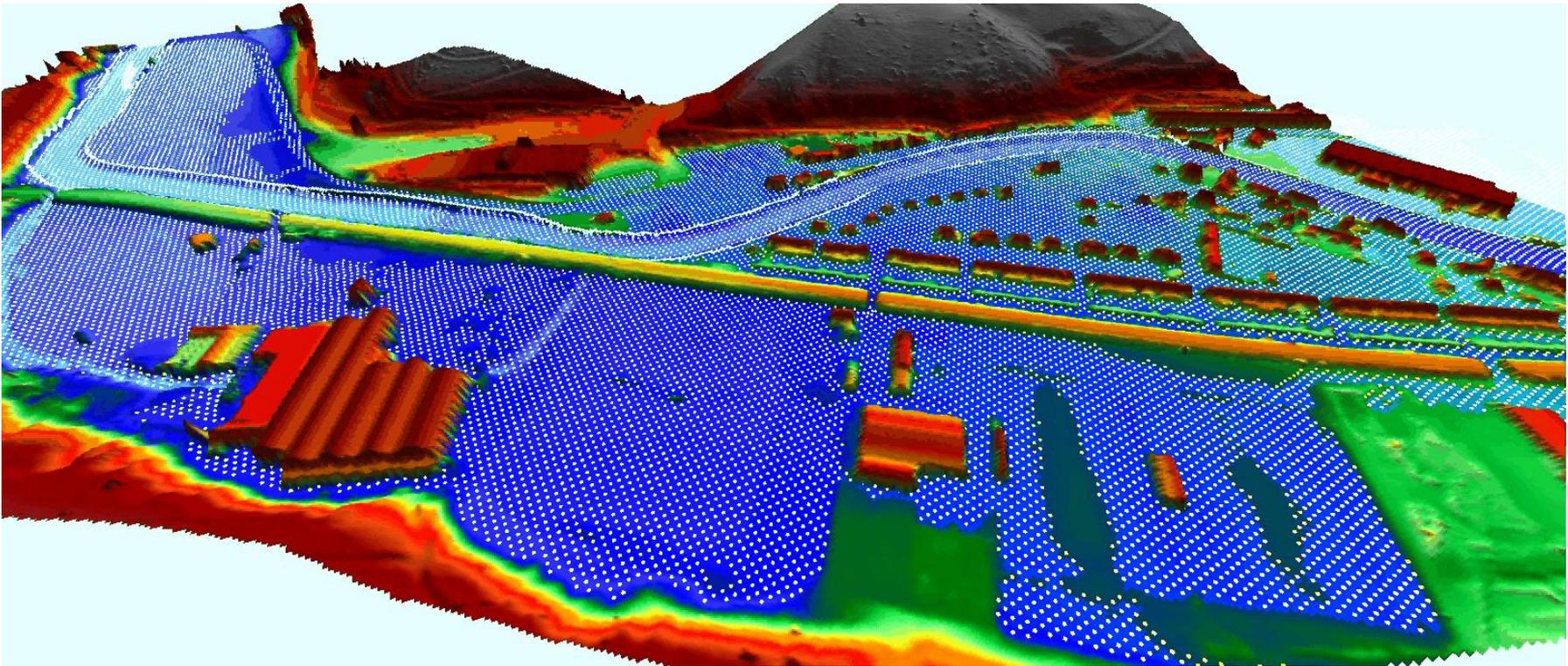
Ernst et al. (2010).
Natural Hazards,
55(2), 181-209.

Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation



Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation

L'aménagement des plaines inondables doit être pensé en fonction du risque

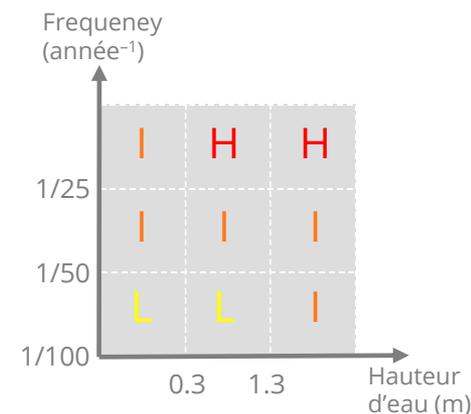
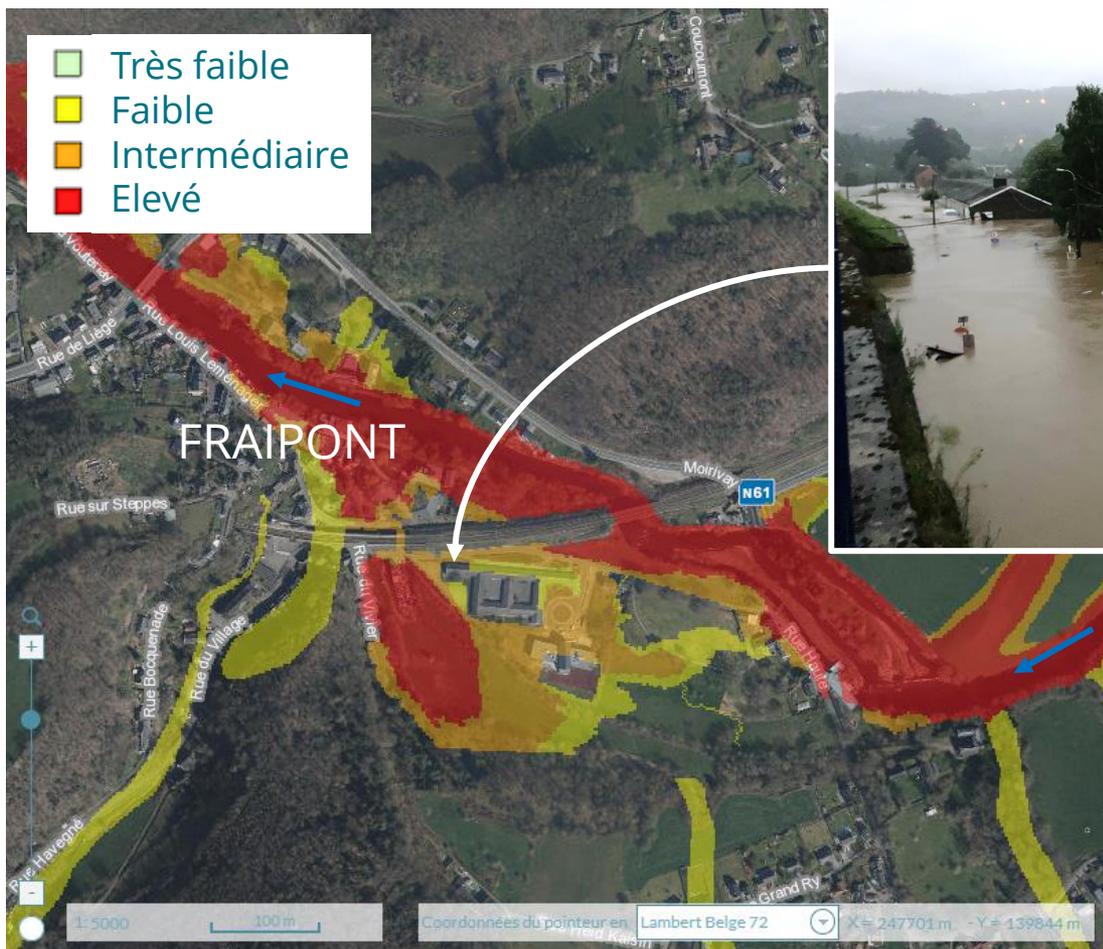


Ecoulements en zone inondable sur base de modélisations hydrauliques

Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation

La conscience du risque contribue à atténuer les conséquences

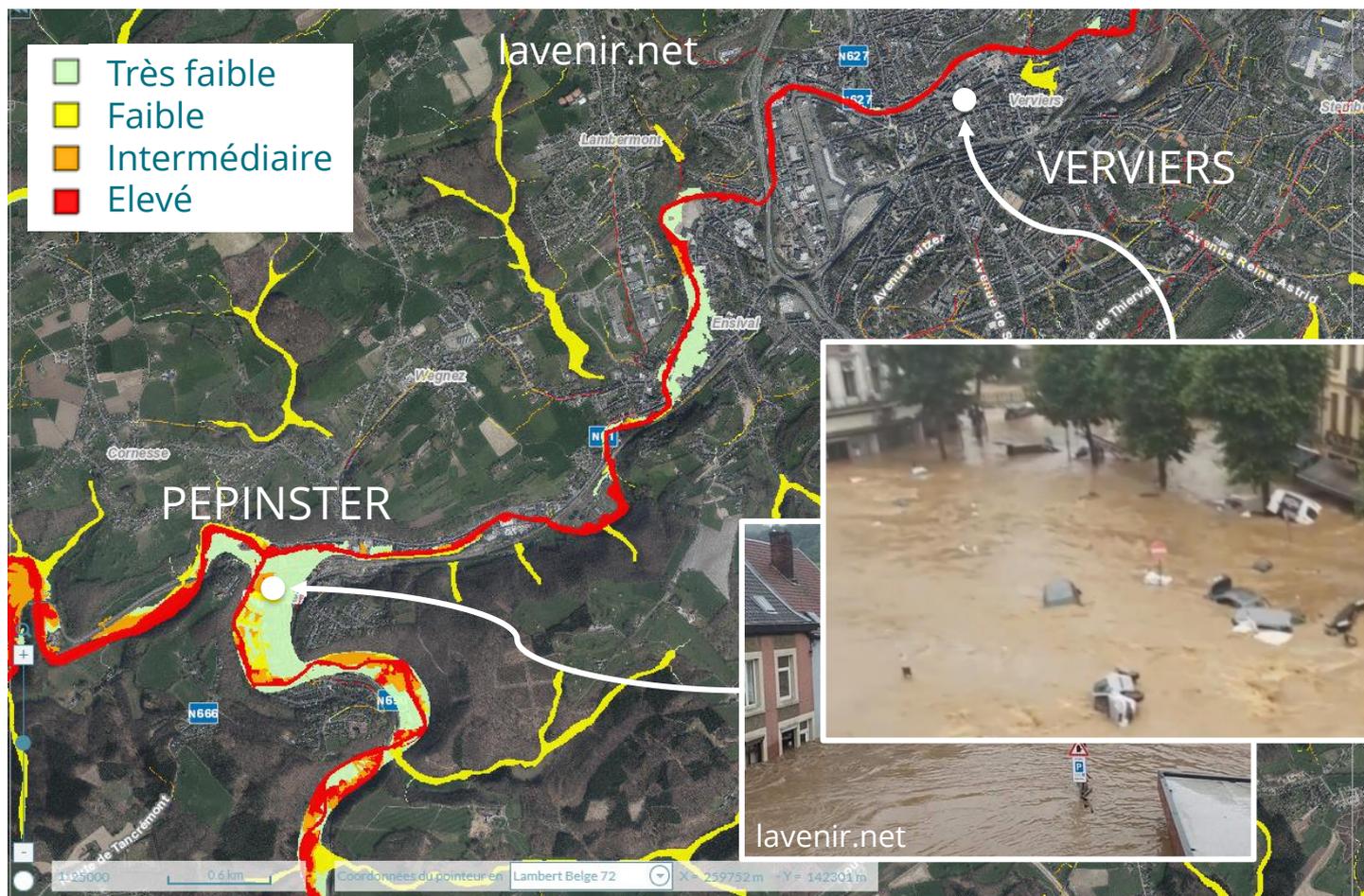
Carte de risque sur la Vesdre



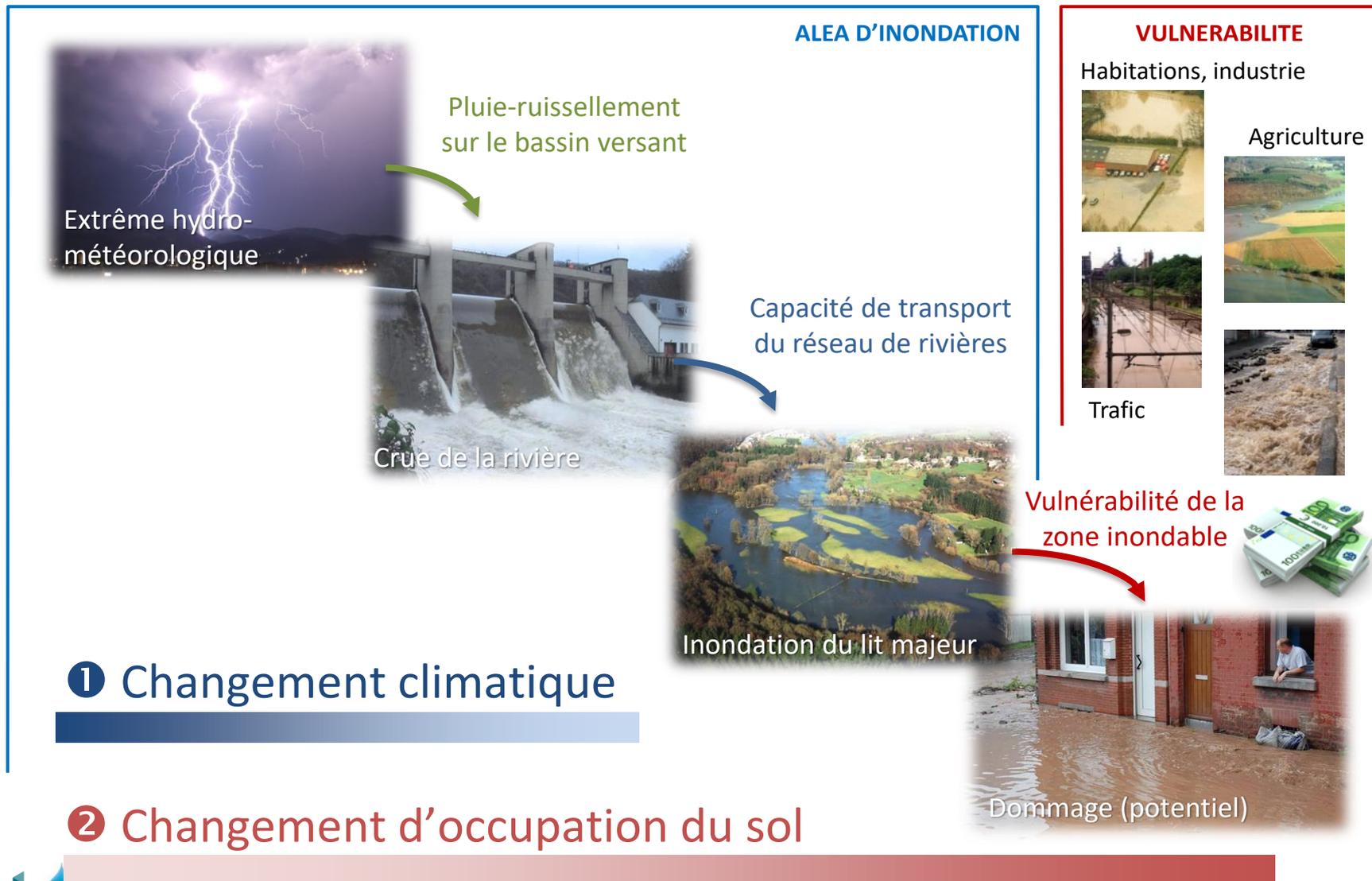
Principaux mécanismes sur lesquels agir pour réduire le risque d'inondation

Tout « effet de surprise » aggrave les conséquences

Carte de
risque sur
la Vesdre



Evolution du risque inondation

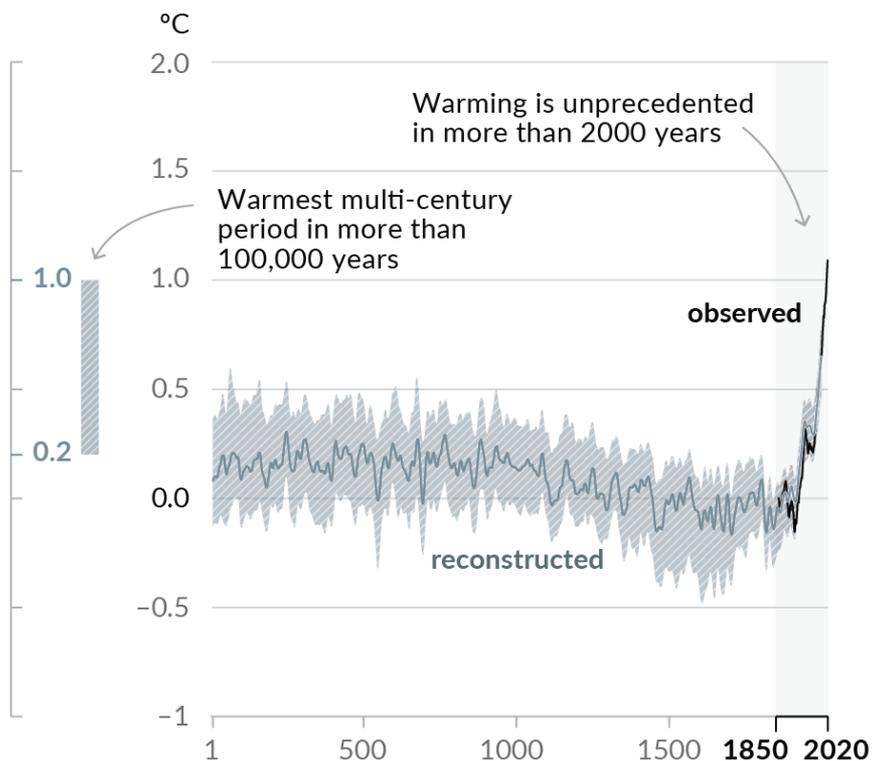


Evolution du risque inondation

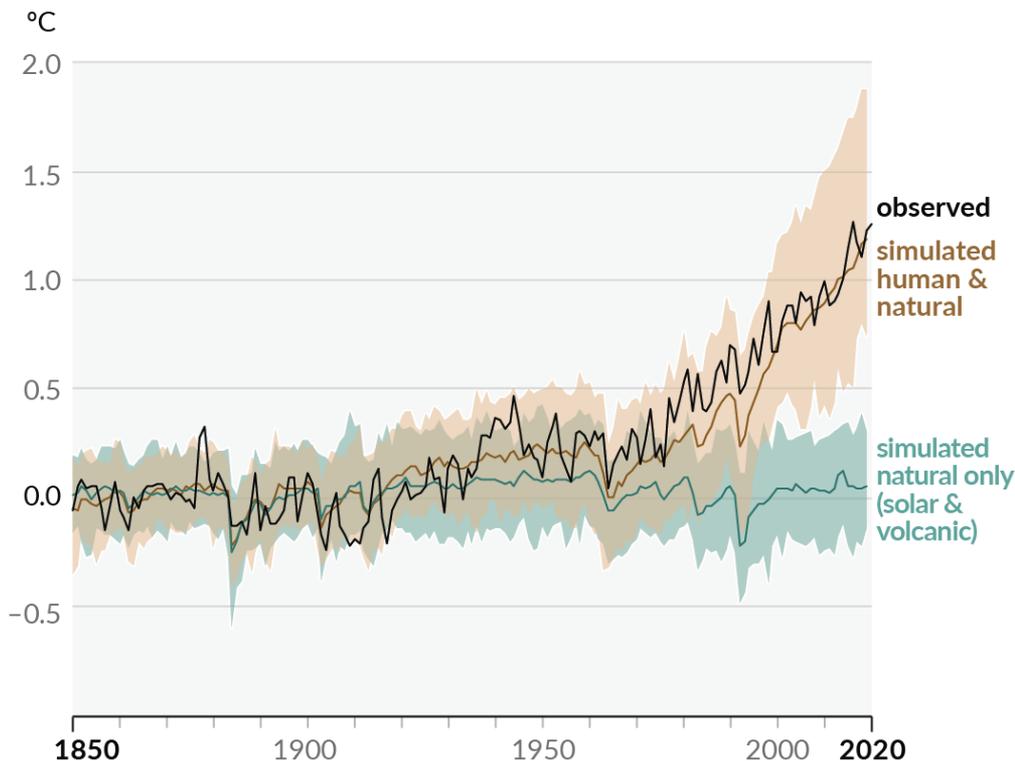
Changement climatique : réchauffement global

Changes in global surface temperature relative to 1850–1900

(a) Change in global surface temperature (decadal average) as **reconstructed** (1–2000) and **observed** (1850–2020)



(b) Change in global surface temperature (annual average) as **observed** and simulated using **human & natural** and **only natural** factors (both 1850–2020)



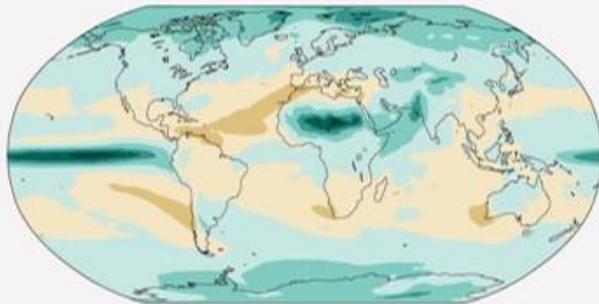
Evolution du risque inondation

Influence sur les précipitations

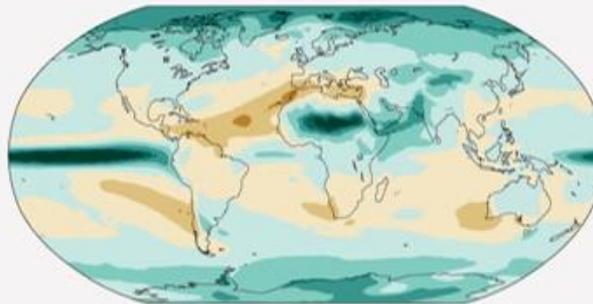
(c) Annual mean precipitation change (%) relative to 1850–1900

Precipitation is projected to increase over high latitudes, the equatorial Pacific and parts of the monsoon regions, but decrease over parts of the subtropics and in limited areas of the tropics.

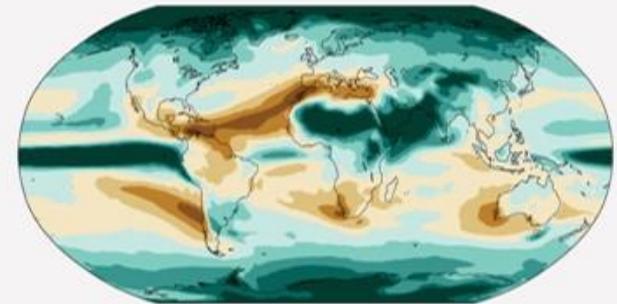
Simulated change at 1.5°C global warming



Simulated change at 2°C global warming



Simulated change at 4°C global warming



Relatively small absolute changes may appear as large % changes in regions with dry baseline conditions

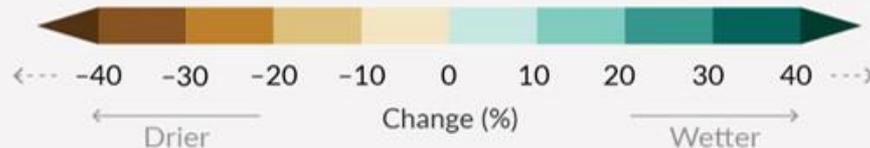


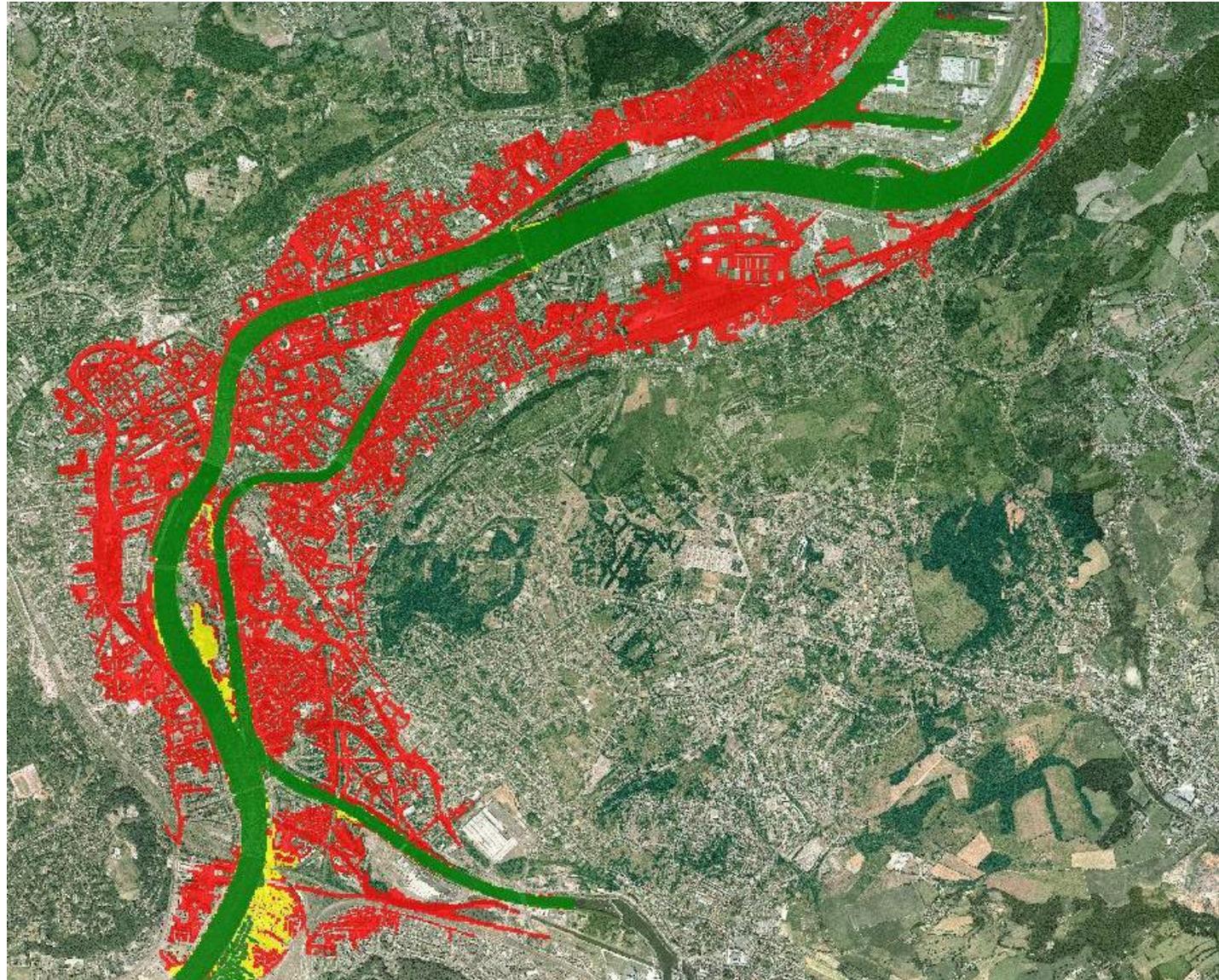
Figure SPM.5 dans IPCC, 2021

Evolution du risque inondation

Un des scénarios...

Emprise
d'inondation à
Liège pour HQ₁₀₀

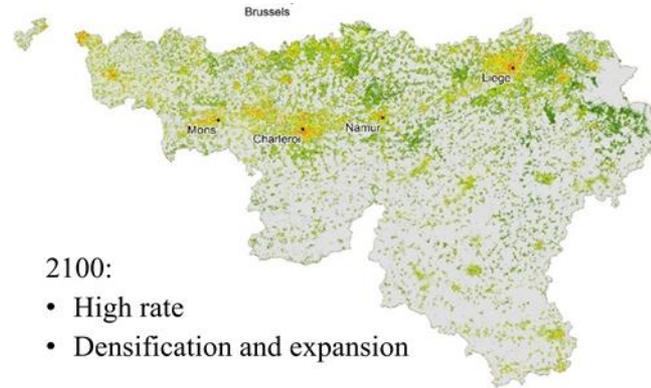
- Présent
- 2021-2050
- 20271-2100



Evolution du risque inondation

Urbanisation

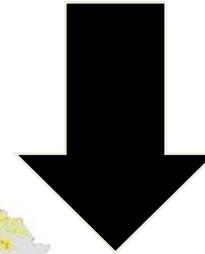
Niveau régional



2100:

- High rate
- Densification and expansion

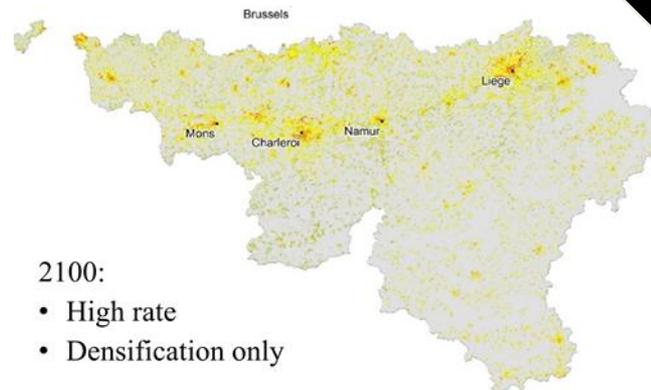
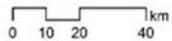
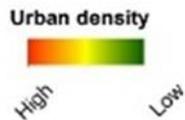
- ✓ Facilite les déplacements
- ✓ Promeut les modes doux
- ✓ Réduit la pression foncière



Niveau local



- ✓ Améliore la consommation énergétique
- ✓ Facilite l'offre de services



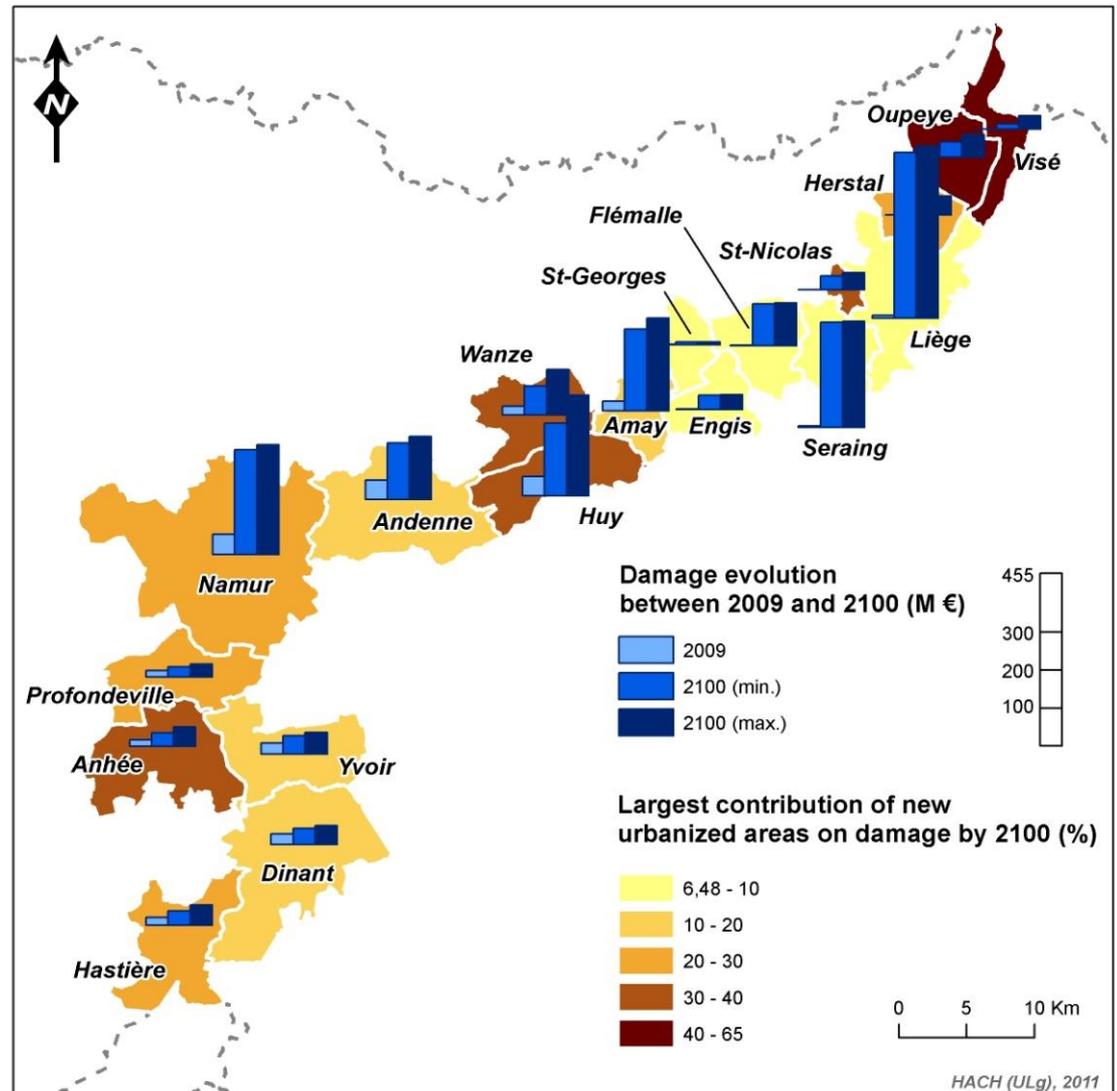
2100:

- High rate
- Densification only



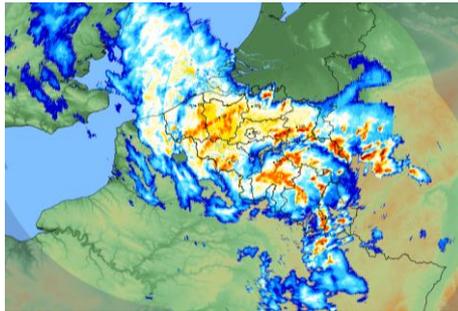
Evolution du risque inondation

Impact de l'urbanisation:
estimation de l'évolution
des dommages dûs aux
crues dans la vallée de la
Meuse

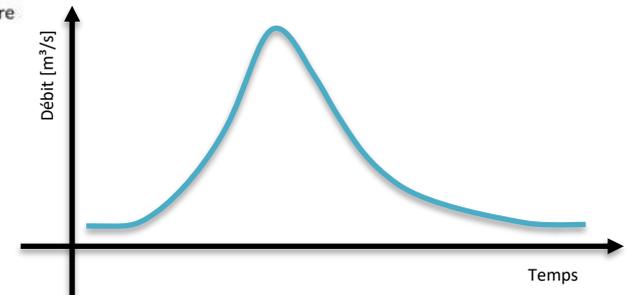
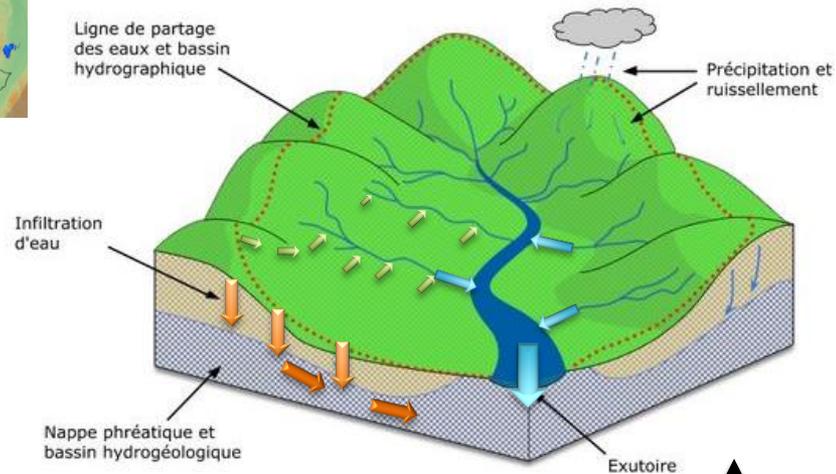


Recherche et perspectives

Utilisation directe des données de pluie pour prédire les débits → modélisation hydrologique

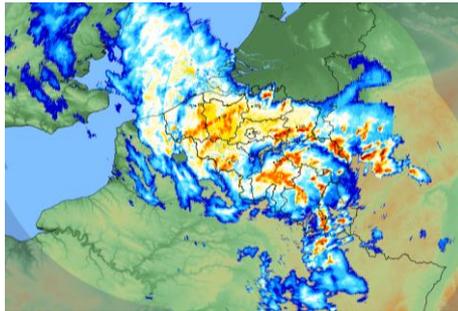


Données radar
RAD-CLIM
(source IRM)

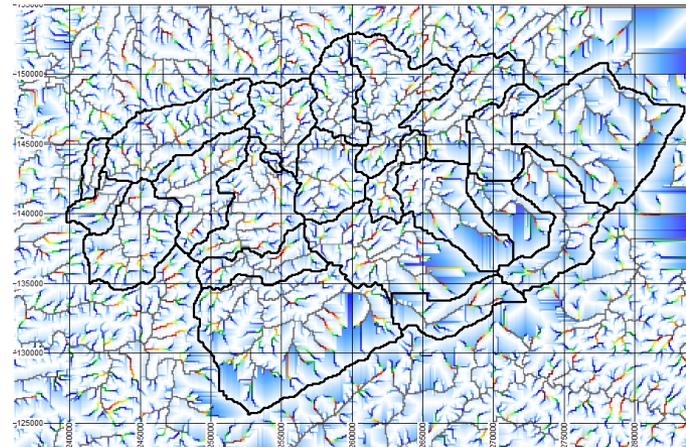


Recherche et perspectives

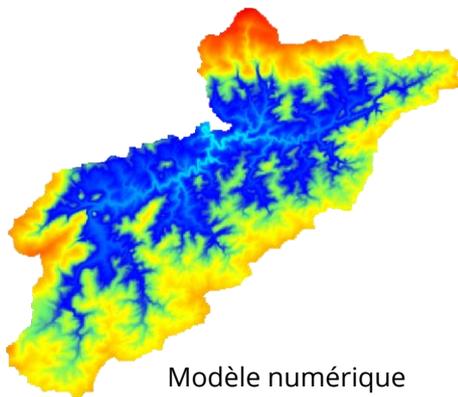
Utilisation directe des données de pluie pour prédire les débits → modélisation hydrologique



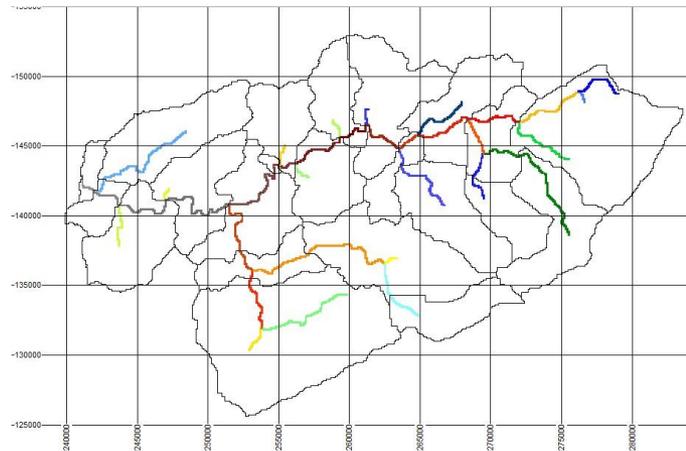
Données radar
RAD-CLIM
(source IRM)



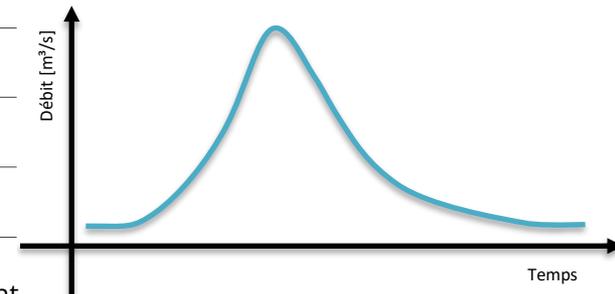
Accumulation



Modèle numérique
de terrain

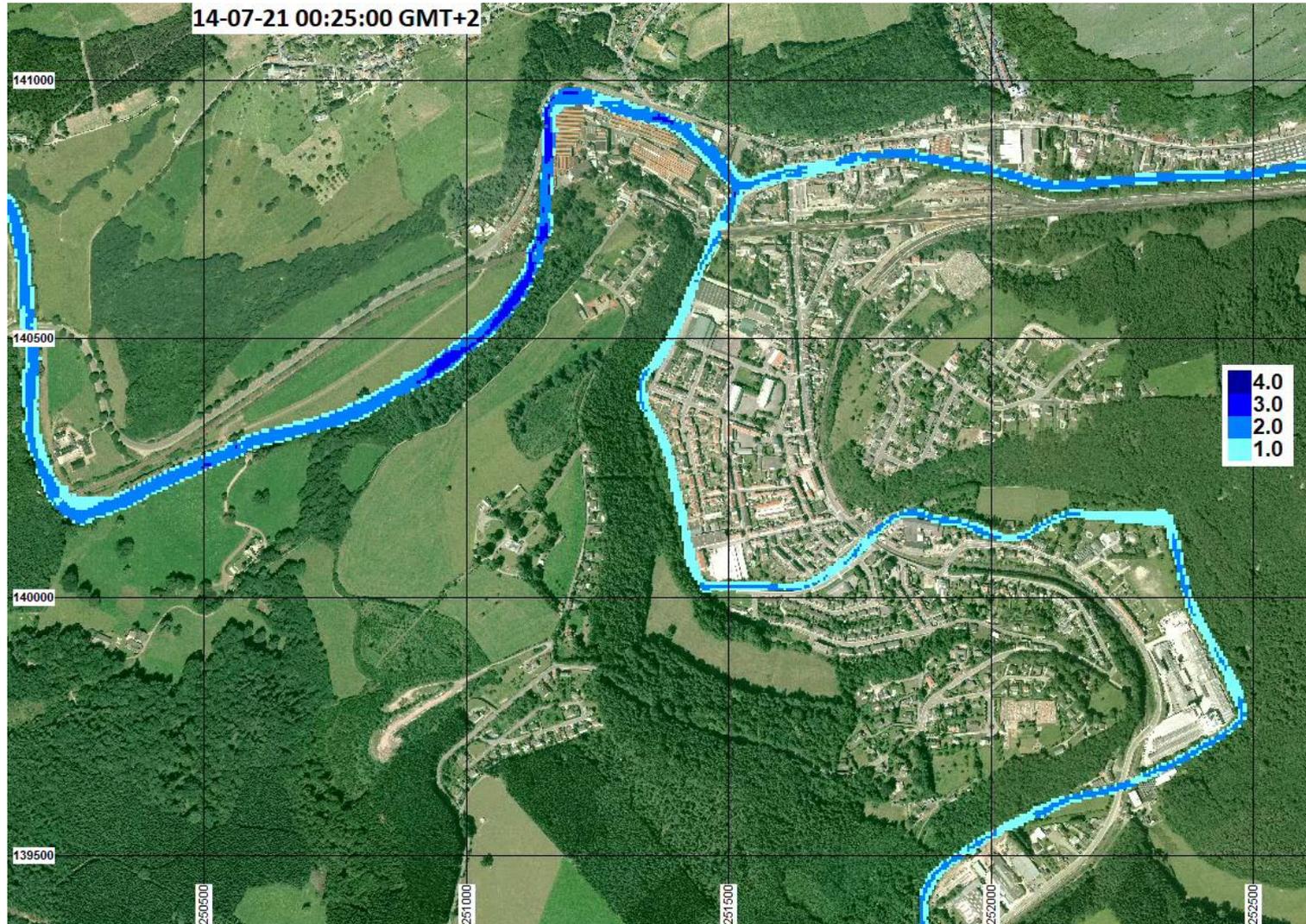


Réseau drainant



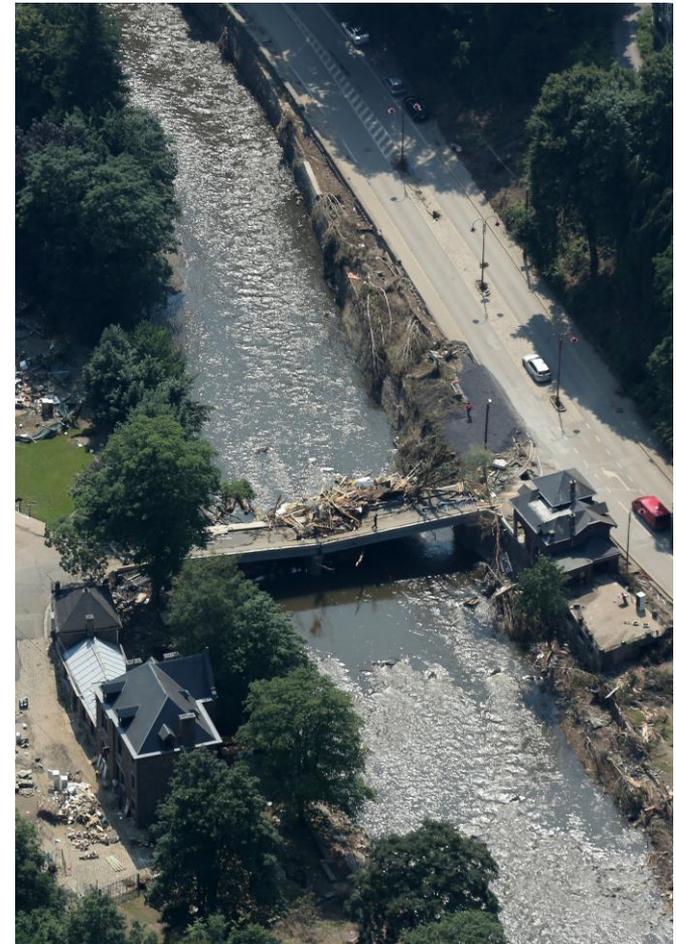
Recherche et perspectives

Modélisation instationnaire en temps réel



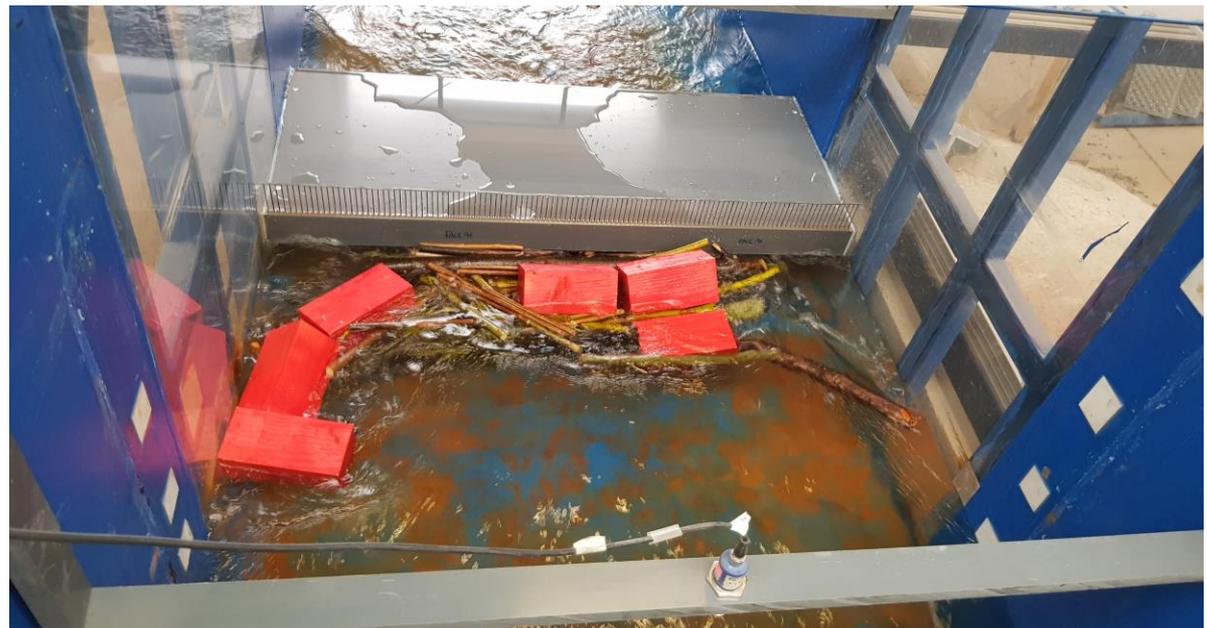
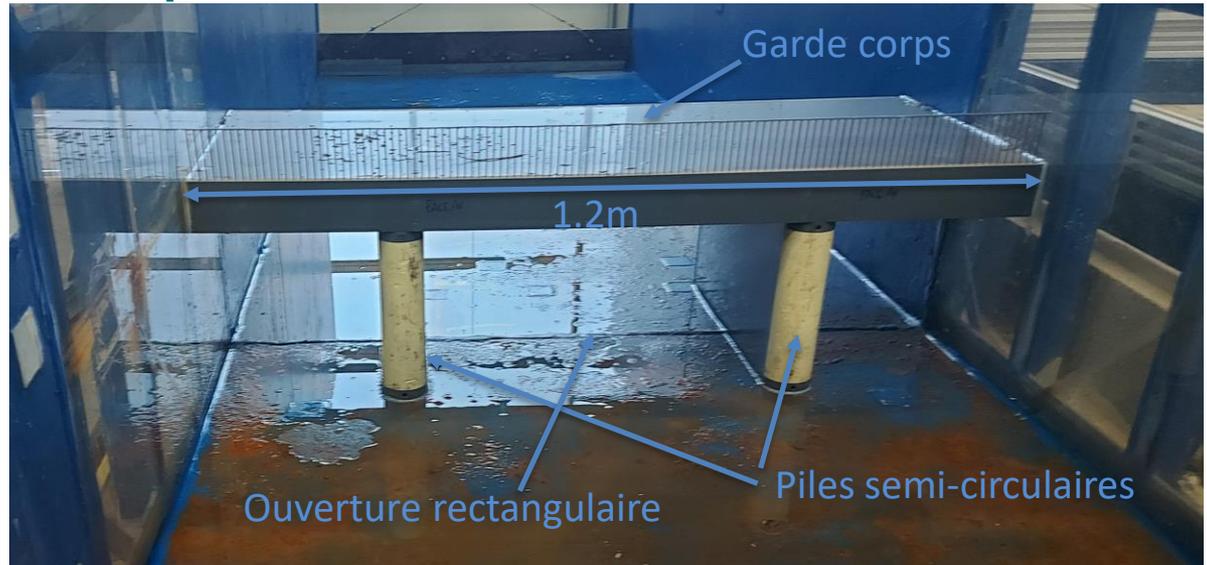
Recherche et perspectives

Impact des embâcles



Recherche et perspectives

Impact des embâcles



Conclusions

- Les **zones à risque d'inondation sont connues** sur base d'événements de référence. Des événements plus extrêmes, mais plus rares, peuvent survenir.
- Les décisions doivent se baser sur une bonne compréhension du **risque** et des **incertitudes**.
- Ne pas miser sur une mesure, mais mettre en œuvre tout un **éventail de mesures** !
- Des phénomènes d'inondation modérée sont **souhaitables**, là où les enjeux sont réduits.
- Une **protection absolue** (risque 0) n'existe pas.
- Le **changement climatique** va très probablement aggraver ce risque.
- L'**urbanisation** et l'**évolution démographique** qui la sous-tend contribuent à augmenter la vulnérabilité aux inondations.
- **Le futur sera différent du passé**



Inondations et cartographie du risque

Sébastien Erpicum, Pierre Archambeau,
Benjamin Dewals, Michel Piroton

S.Erpicum@uliege.be