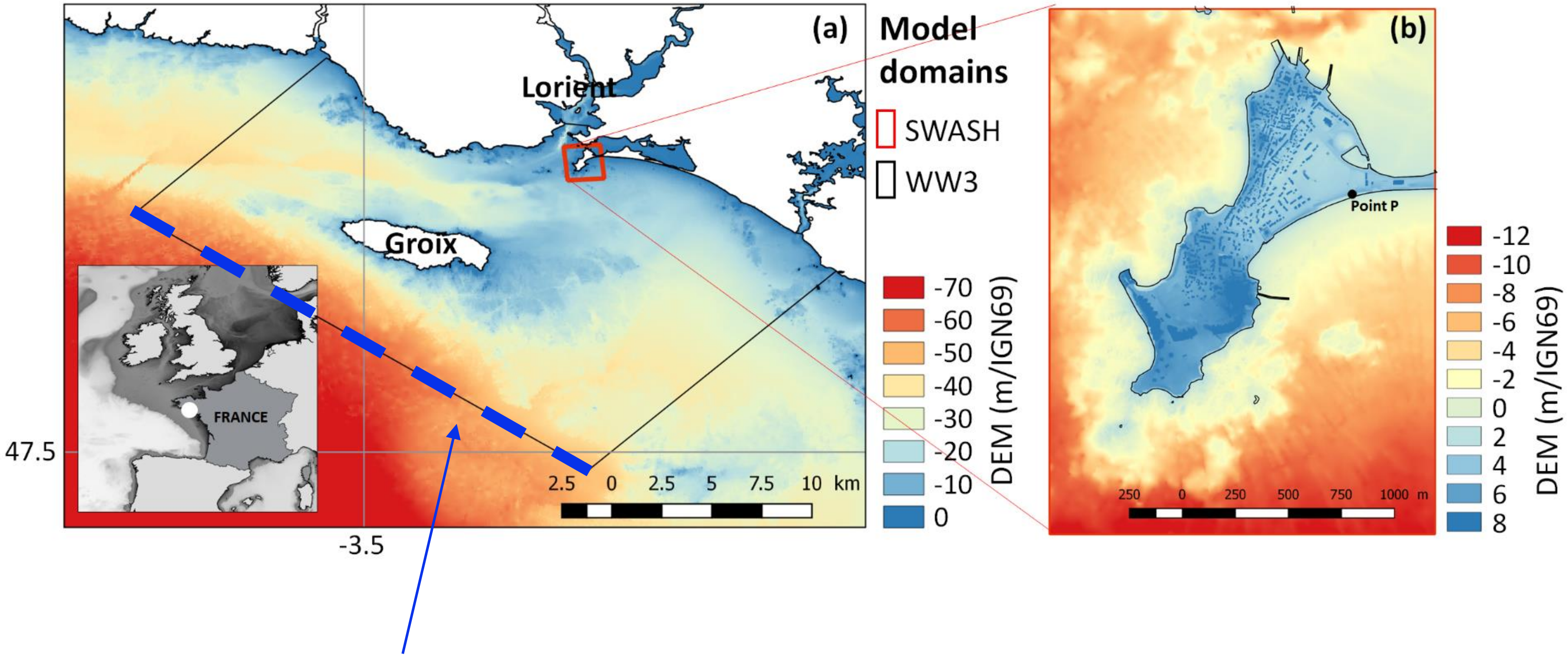
Analyse de l'influence des forçages météo-océaniques dans les projections futures probabilistes de la submersion à Gâvres (Bretagne)

J. Rohmer[*], D. Idier[*], R. Thieblemont[*], G. Le Cozannet[*], F. Bachoc[§]

[*] brgm — Geoscience for a sustainable Earth

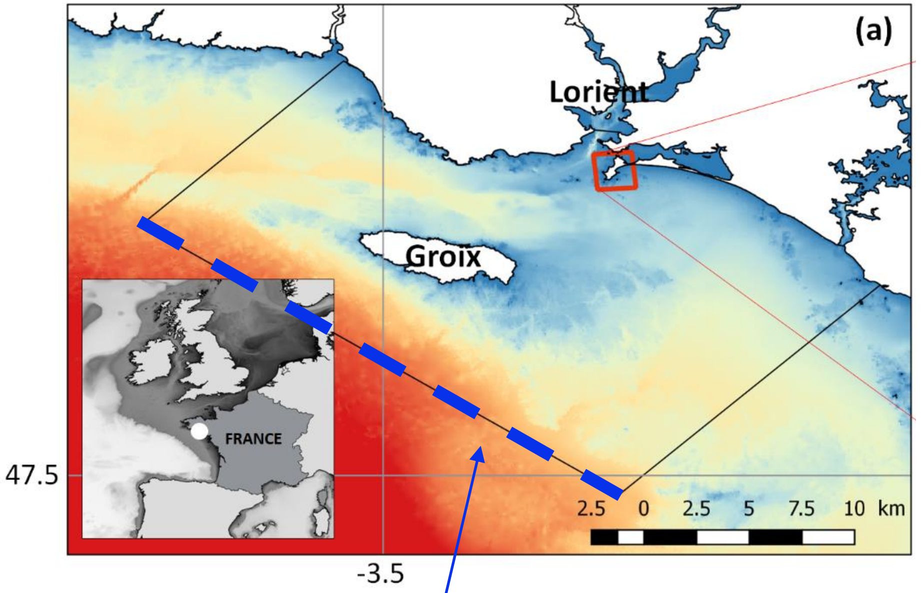
[§] INSTITUT de MATHEMATIQUES de TOULOUSE

Inondation marine à Gâvres



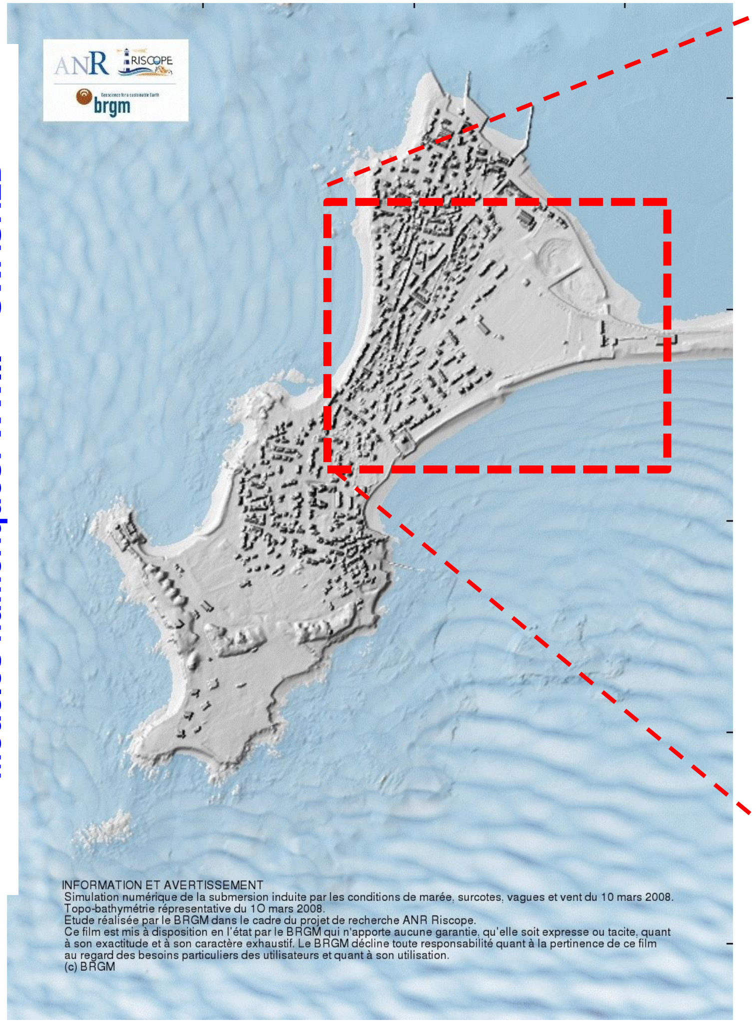
Conditions limites → forçages météo-océaniques au large (vagues, niveau d'eau, vent)

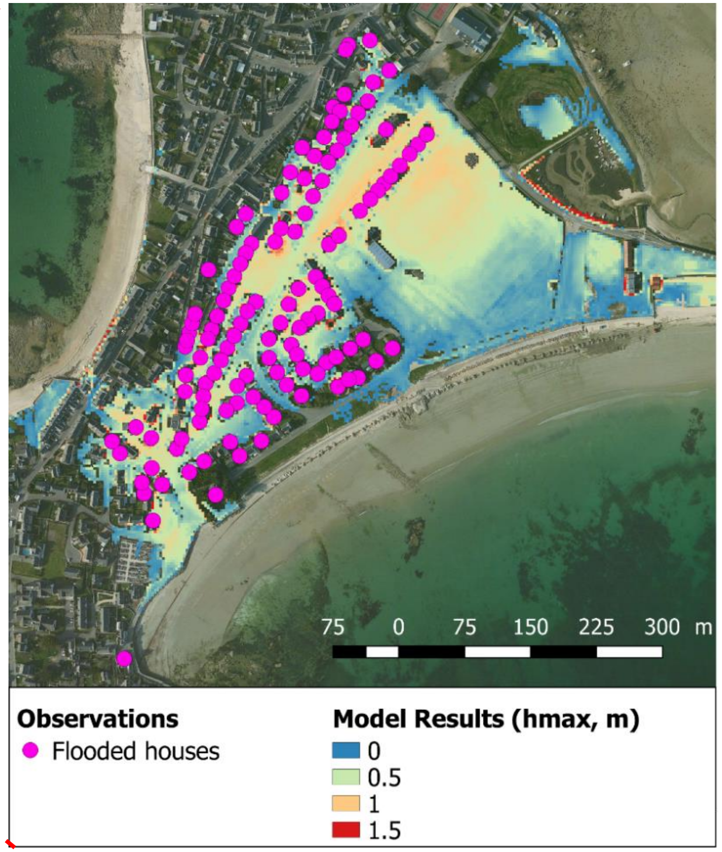
Inondation marine à Gâvres



Conditions limites → forçages météo-océaniques au large (vagues, niveau d'eau, vent)

Modèles numériques: WWIII + SWASH2D



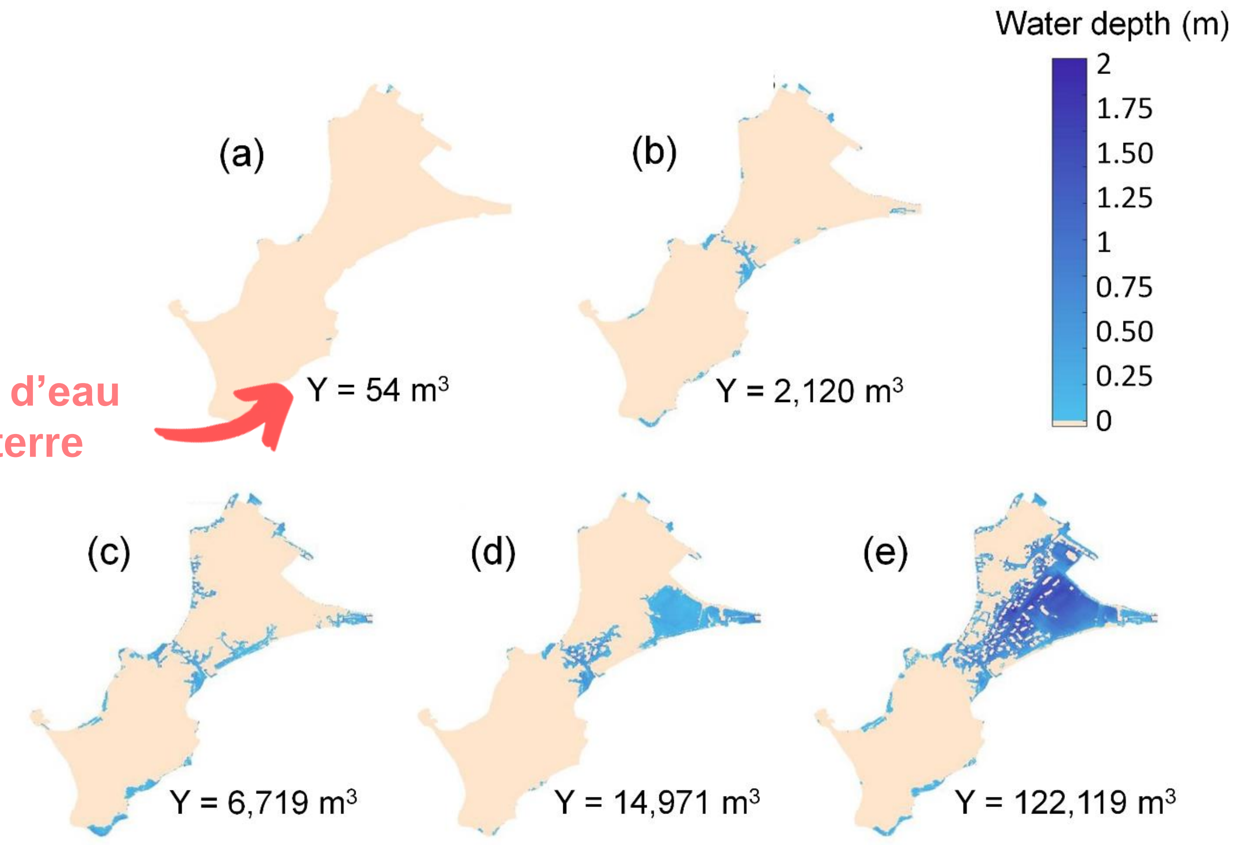


Johanna – 10 March 2008

Temps de calcul >1 jour!!

Contacts: [D. Idier]

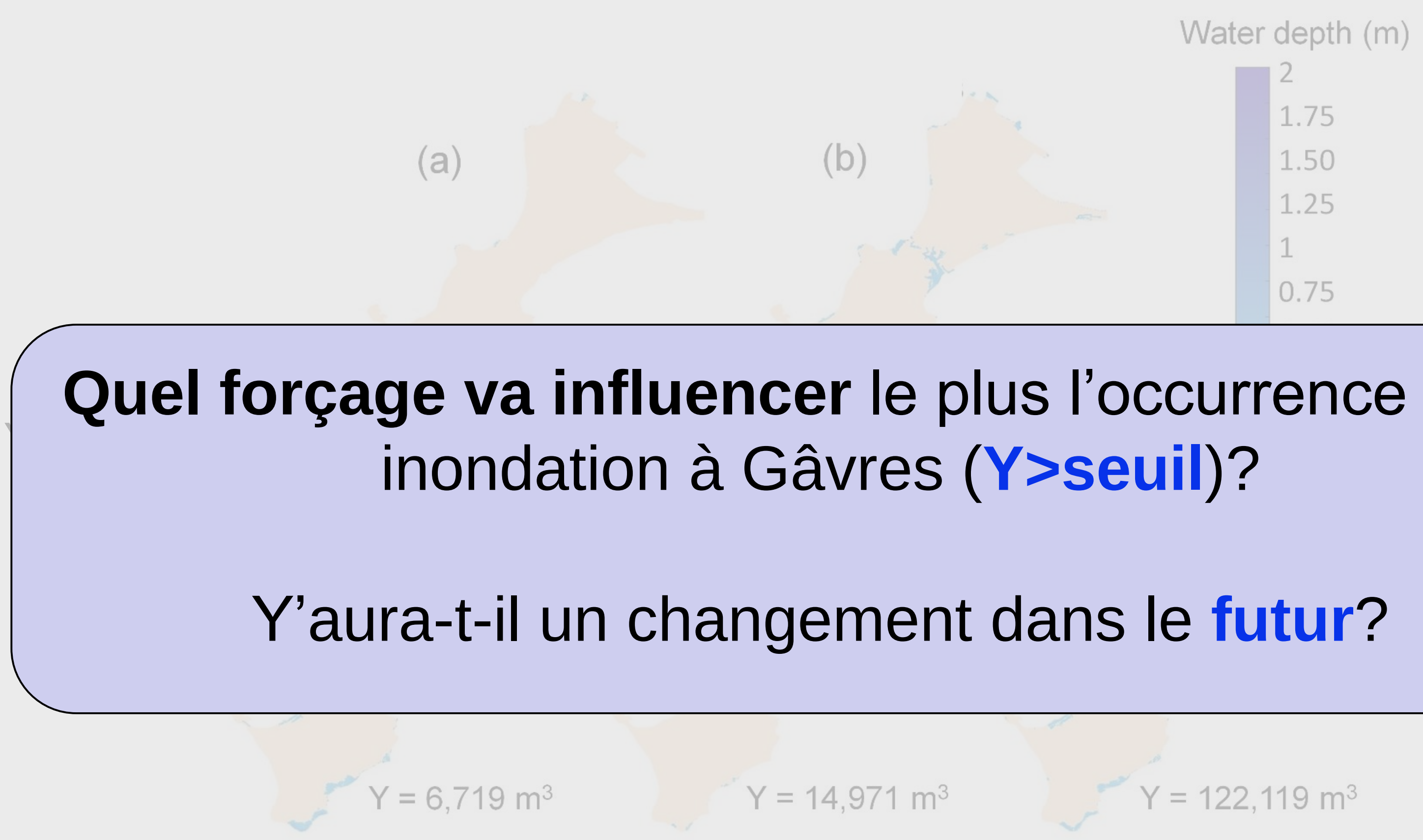
Motivation



Y: volume d'eau entrant à terre

5 résultats de simulation pour **différents forçages au large** (vague, vent, niveau d'eau)

Motivation

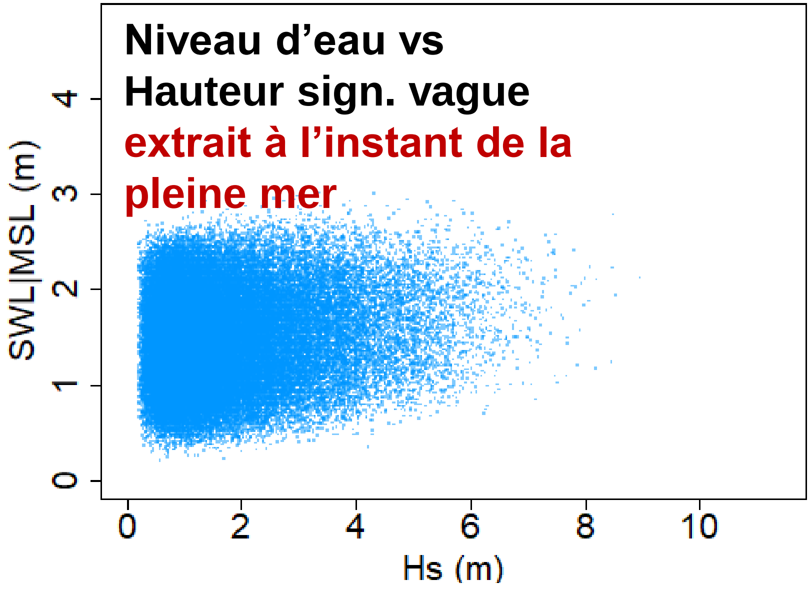


Quel forçage va influencer le plus l'occurrence d'une inondation à Gâvres (**Y>seuil**)?

Y'aura-t-il un changement dans le **futur**?

5 résultats de simulation pour **différents forçages au large** (vague, vent, niveau d'eau)

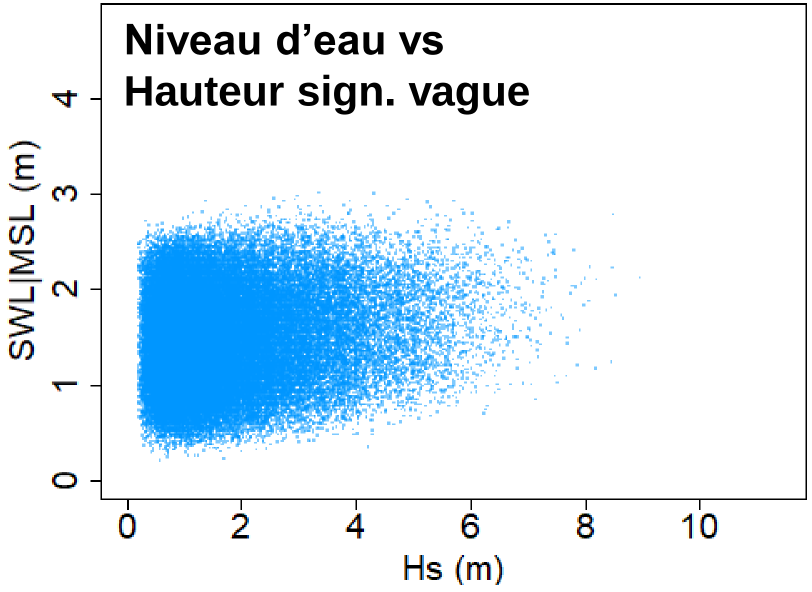
Forçages météo-océaniques – données « hindcast » 1900-2016, 80000 sixplets [1]

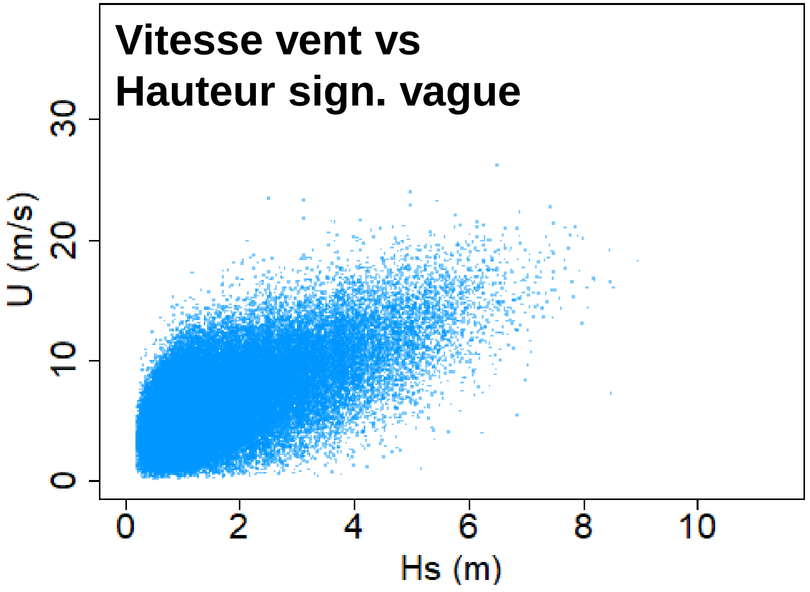


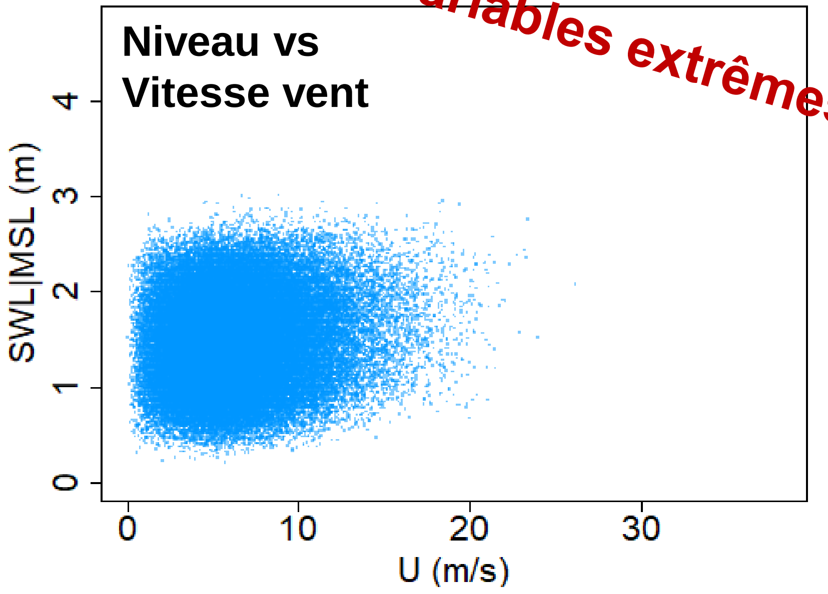
[1] Idier et al. 2020

Forçages météo-océaniques – données « hindcast » 1900-2016, 80000 sixplets [1]

Variables extrêmes



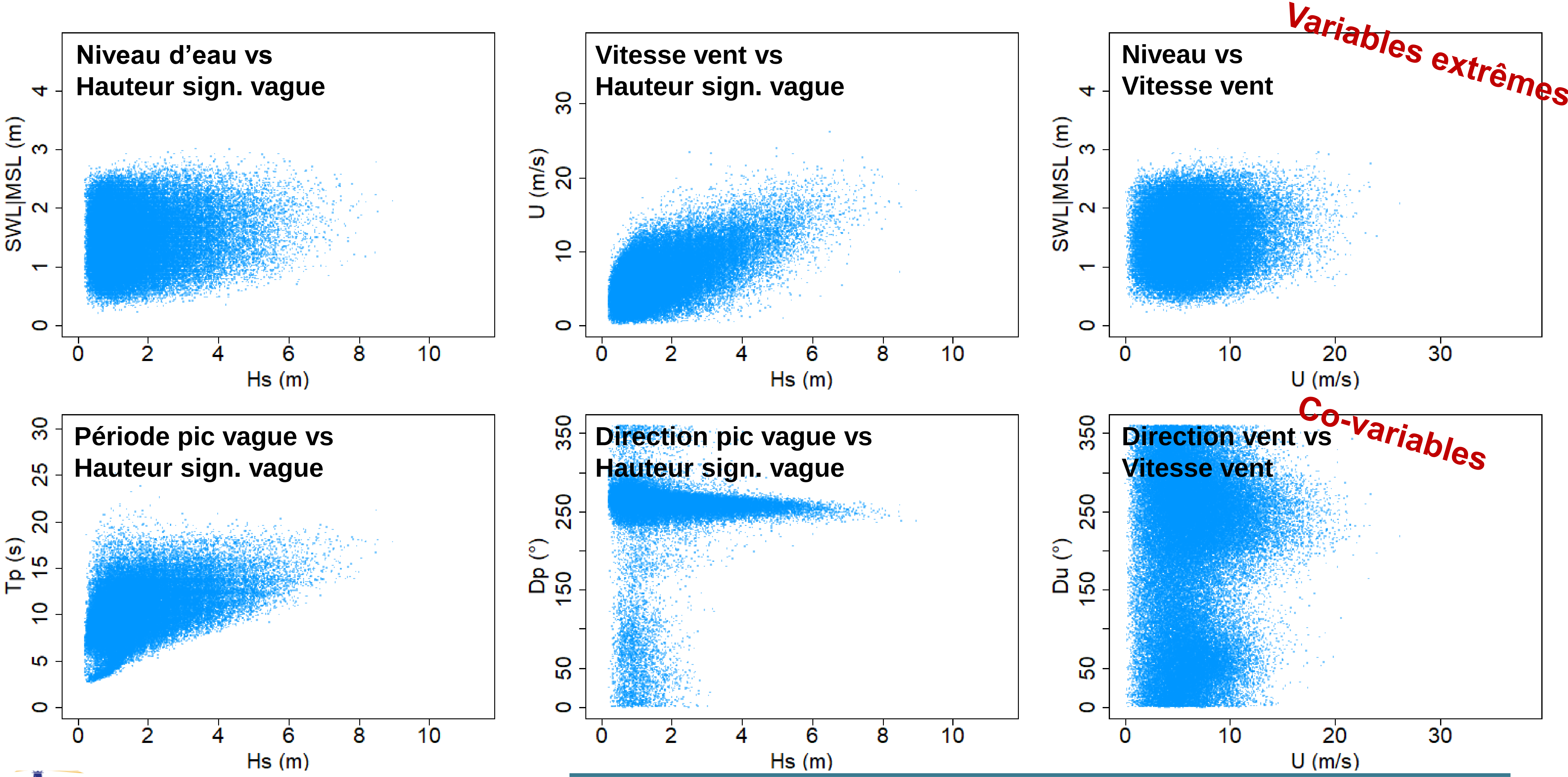




RISCOPE

[1] Idier et al. 2020

Forçages météo-océaniques – données « hindcast » 1900-2016, 80000 sixplets [1]

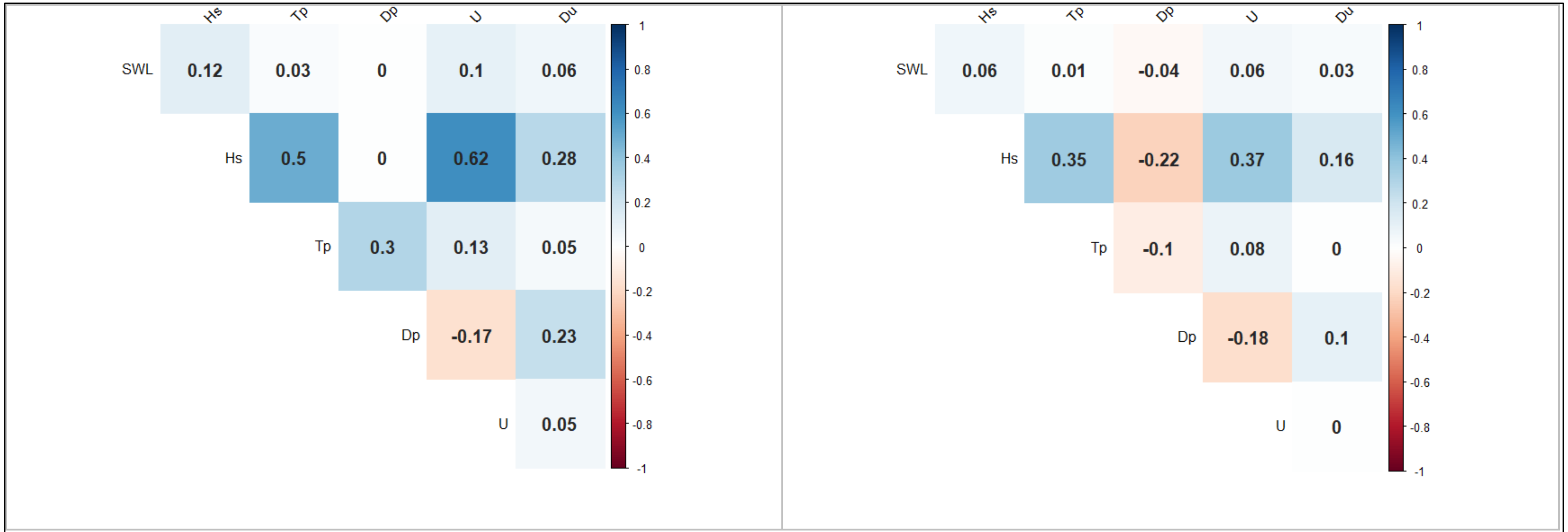


RISCOPE

[1] Idier et al. 2020

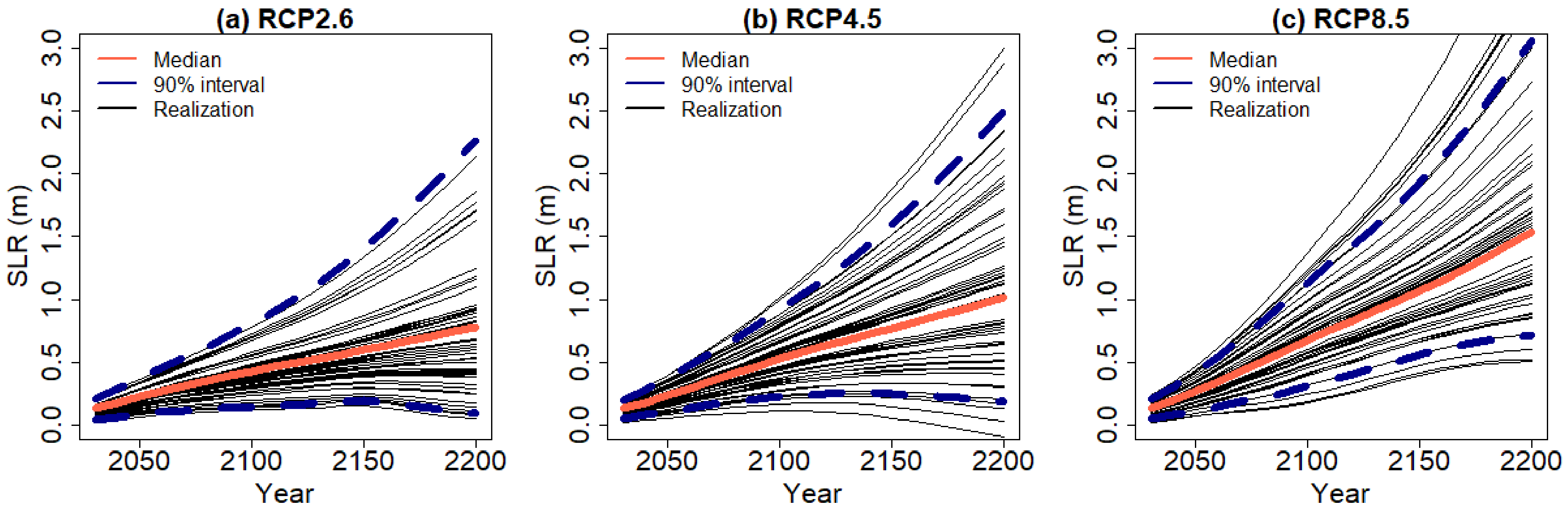
Analyse de **corrélation**

Pearson **Kendall**



Coefficients de corrélation des conditions

Projection probabiliste niveau marin **SLR** (proche Gâvres, ref. année 2000)



SLR(2100,med) =0.40m

SLR(2100,med) =0.50m

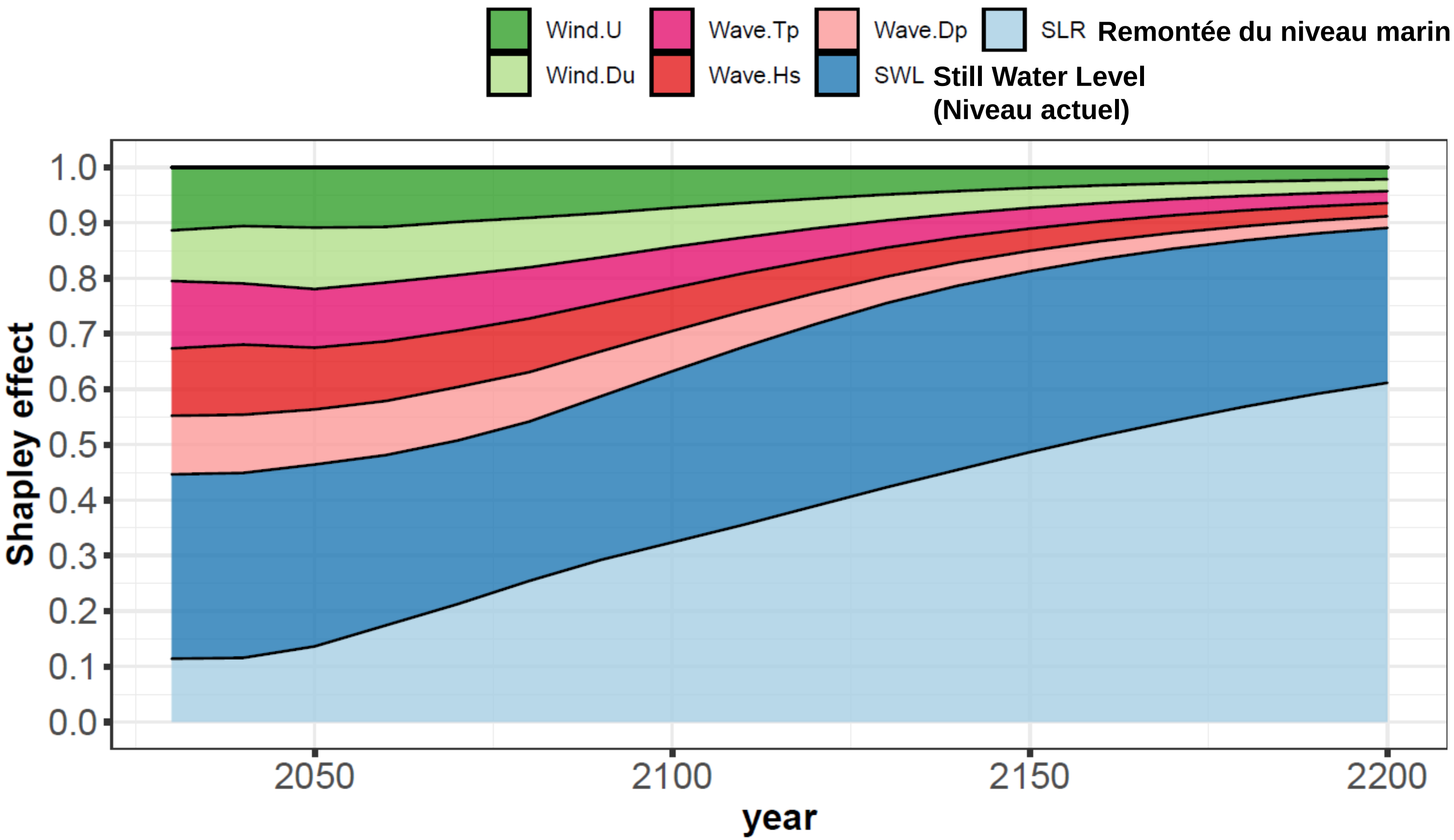
SLR(2100,med) =0.65m

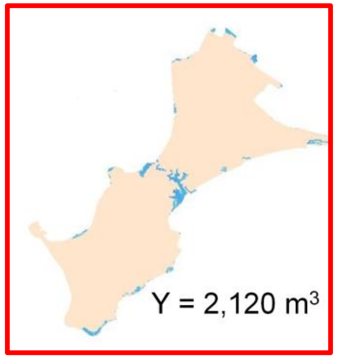
RCP (*Representative Concentration Pathway*): scénario de concentration de gaz à effet de serre dans le futur

RISCOPE

Kopp et al. (2014) compatible SROCC (2019)

Objectif: influence sur **{Y>2000m3}**





Définition du problème

Estimer l'influence respective forçages + SLR sur l'occurrence de l'inondation	
Méthode: analyse globale de sensibilité [1]	

[1] e.g. Saltelli et al. 2008 [2] Sobol' 1990

Définition du problème

Estimer l'influence respective forçages + SLR sur l'occurrence de l'inondation	
Méthode: analyse globale de sensibilité **[1]**	

Objectif: estimer la contribution individuelle à l'incertitude (mesurée par **Var(*Y*)**) de chaque entrée incertaine X_i

$$S_{X_i} = \frac{\mathrm{Var}(E(Y|X_i = x_i^*))}{\mathrm{Var}(Y)}$$

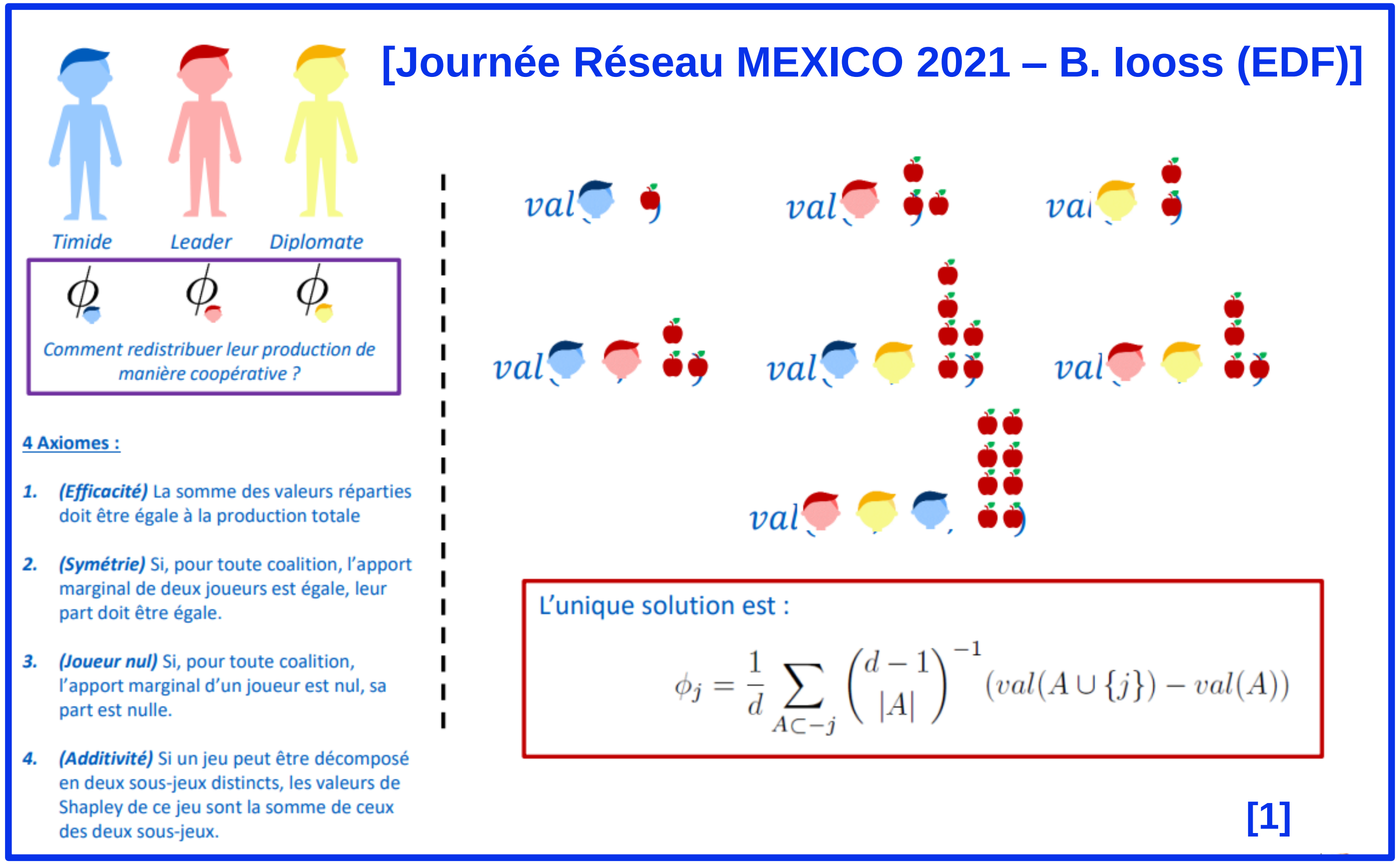
= Indice de Sobol' de 1er ordre **[2]**
= mesure la contribution de X_i à Var(Y)

où *i*={1,2,…,k} avec k variables d'entrée *X*

Y volume d'eau entrant à terre

[1] e.g. Saltelli et al. 2008 [2] Sobol' 1990

Estimer l’influence respective forçages + SLR sur l’occurrence de l’inondation	
Méthode: analyse globale de sensibilité	
Difficulté 1: tenir compte de la dépendance	Shapley eff. [1]



[1] Shapley 1953

Estimer l'influence respective forçages + SLR sur l'occurrence de l'inondation	
Méthode: analyse globale de sensibilité	
Difficulté 1: tenir compte de la dépendance	Shapley eff. [1]

[Journée Réseau MEXICO 2021 – B. Iooss (EDF)]

Dans notre problème

Travailleurs = forçages météo-océaniques + SLR

Production = variance sur Y (volume d'eau)

3. *(Joueur nul)* Si, pour toute coalition, l'apport marginal d'un joueur est nul, sa part est nulle.

4. *(Additivité)* Si un jeu peut être décomposé en deux sous-jeux distincts, les valeurs de Shapley de ce jeu sont la somme de ceux des deux sous-jeux.

$$\phi_j = \frac{1}{d} \sum_{A \subset -j} \binom{d-1}{|A|} \ (val(A \cup \{j\}) - val(A))$$

[1]

[1] Shapley 1953

Adaptation au problème de **sensibilité**

Effets de Shapley **[1,2]**

$$Sh_i = \frac{1}{k} \sum_{A \subseteq K \setminus \{i\}} \binom{k-1}{|A|}^{-1} \left(S_{A \cup \{i\}}^{\text{closed}} - S_A^{\text{closed}}\right)$$

$$S_A^{\text{closed}} = \frac{\mathrm{Var}(\mathrm{E}(Y)|X_A)}{\mathrm{Var}(Y)}$$

où $K=\{1,2,\ldots,k\}$ avec k variables d'entrée X

Y volume d'eau entrant à terre

Intérêt: indices *Sh* incluent

- Effet de chaque variable (**effet individuel**)
- Interactions entre les variables (**effet conjoint**)
- Effet de **dépendance entre variables**

[1] Owen & Prieur 2016; [2] Iooss & Prieur 2019

Estimer l’influence respective forçages + SLR sur l’occurrence de l’inondation	
Méthode: analyse globale de sensibilité	
Difficulté 1: tenir compte de la dépendance	Shapley eff.
Difficulté 2: adapté au problème d’occurrence	Target Shap. **[1]**

[1] Idrissi et al. 2021

Adaptation au problème {Y>seuil Y_C}

Target Shapley effects [1]

$$TSh_i = \frac{1}{k} \sum_{A \subseteq K \setminus \{i\}} \binom{k-1}{|A|}^{-1} \left(TS_{A \cup \{i\}}^{\text{closed}} - TS_A^{\text{closed}}\right)$$

$$TS_A^{\text{closed}} = \frac{\mathrm{Var}(\mathrm{E}(\mathrm{I}_{\{Y>Y_C\}})|X_A)}{\mathrm{Var}(\mathrm{I}_{\{Y>Y_C\}})}$$

où K={1,2,…,k} avec k variables d’entrée *X*

Y volume d’eau entrant à terre

I fonction indicatrice

Y_C seuil

[1] Idrissi et al., 2021

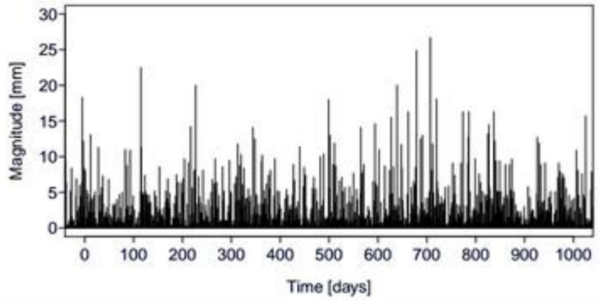
Estimer l’influence respective forçages + SLR sur l’occurrence de l’inondation	
Méthode: analyse globale de sensibilité	
Difficulté 1: tenir compte de la dépendance	Shapley eff.
Difficulté 2: adapté au problème d’occurrence	Target Shap. [1]

Estimateur possible ‘data given’ de **[Broto et al. (2020)]**
(approche plus proche voisins)

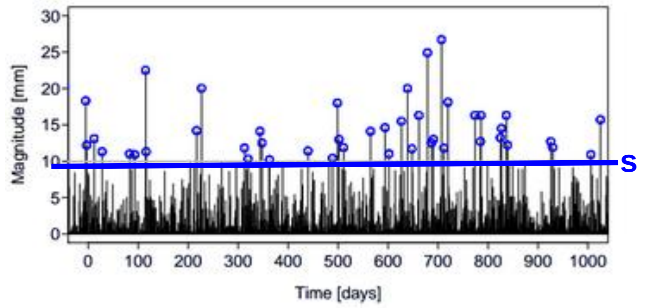
Estimer l’influence respective forçages + SLR sur l’occurrence de l’inondation	
Méthode: analyse globale de sensibilité	
Difficulté 1: tenir compte de la dépendance	Shapley eff.
Difficulté 2: adapté au problème d’occurrence	Target Shap.
Difficulté 3: générer des **forçages extrêmes + dépendance**	MEVA [1]

[1] méthode semi-paramétrique Heffernan and Tawn (2004)

1. Modéliser les **marginales** : **approche POT-GPD [1]**



Série(s) temporelle(s)



Analyse fréquentielle

Sélection d'un échantillon de valeurs « extrêmes », indépendantes et stationnaires (ici par la méthode Peaks Over Threshold (POT) avec le seuil s)

$x > u, \xi \neq 0$

Ajustement d'une distribution de probabilité adaptée

$$P(X \leq x) = F_X(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 - \widehat{F}_X(s)\right)\left(1 + \dfrac{\xi(x-s)}{\sigma}\right)_+^{-\frac{1}{\xi}} & \text{si } x > s,\ \xi \neq 0 \\ \widehat{F}_X(x) & \text{si } x \leq s \end{cases}$$

Ajustement d'une distribution de probabilité à l'échantillon obtenu (ici GPD (Generalized Pareto Distribution))

Paramètres de loi estimés par maximum de vraisemblance par ex.

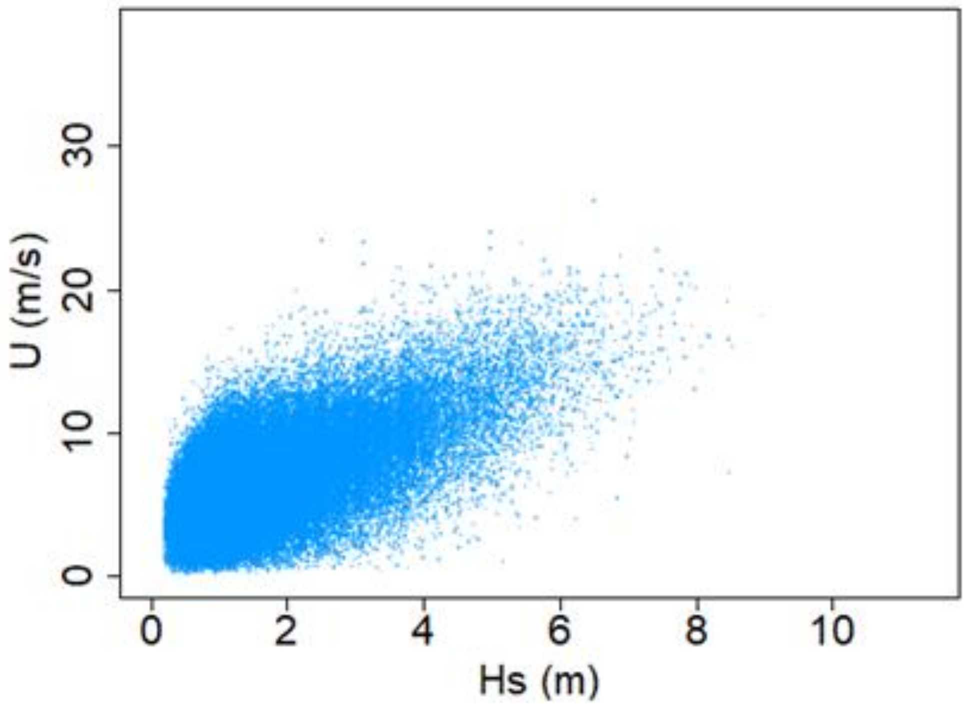
σ: échelle
ξ: forme

$\widehat{F}_X$ **distribution empirique**

RISCOPE

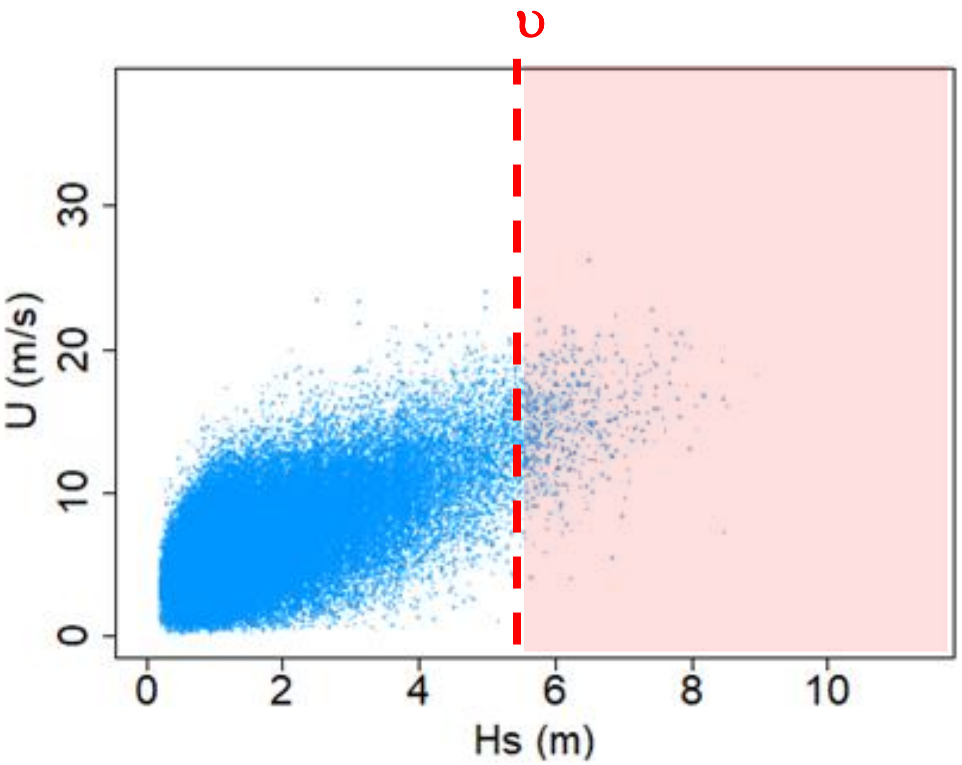
[1] Coles 2001

Modéliser la dépendance: approche **conditionnelle des valeurs extrêmes [1]**



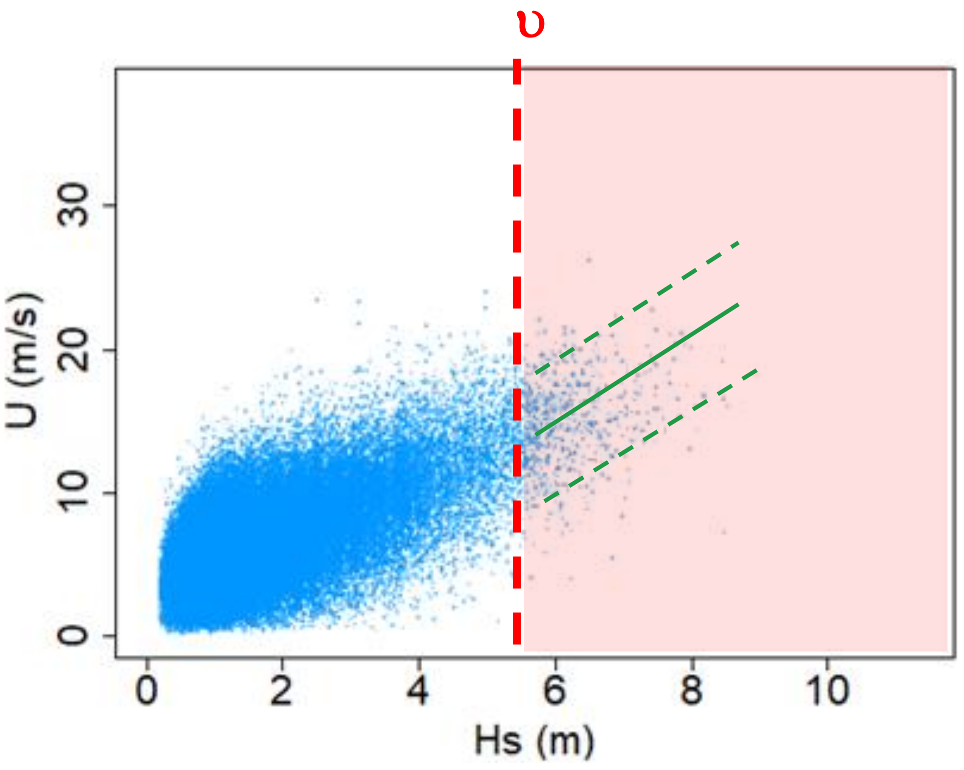
[1] méthode semi-paramétrique Heffernan and Tawn (2004)

2. Modéliser la **dépendance** des valeurs extrêmes [1]



[1] méthode semi-paramétrique Heffernan and Tawn (2004)

2. Modéliser la **dépendance** des valeurs extrêmes [1]



- Soit (*Hs*,*U*)
- Transformation de Gumbel $-\log(-\log(F_i))\,, i = Hs, U$
- Pour *h*>υ, on suppose

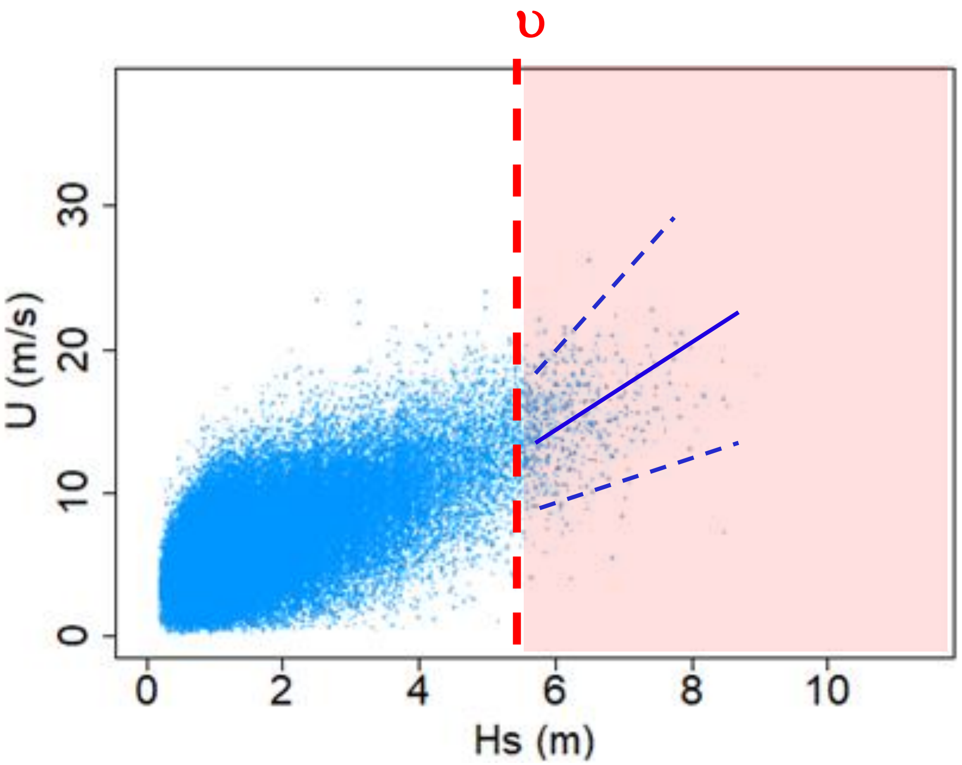
$$U|(Hs = h) = \alpha h \qquad + Z$$

avec *Z* le résidu indépendant de *Hs* supposé normalement distribué (pour l'estimation)

$\alpha \in [-1,1]$

[1] méthode semi-paramétrique Heffernan and Tawn (2004)

2. Modéliser la **dépendance** des valeurs extrêmes **[1]**



- Soit (*Hs*,*U*)
- Transformation de Gumbel $-\log(-\log(F_i))\,, i = Hs, U$
- Pour *h*>υ, on suppose

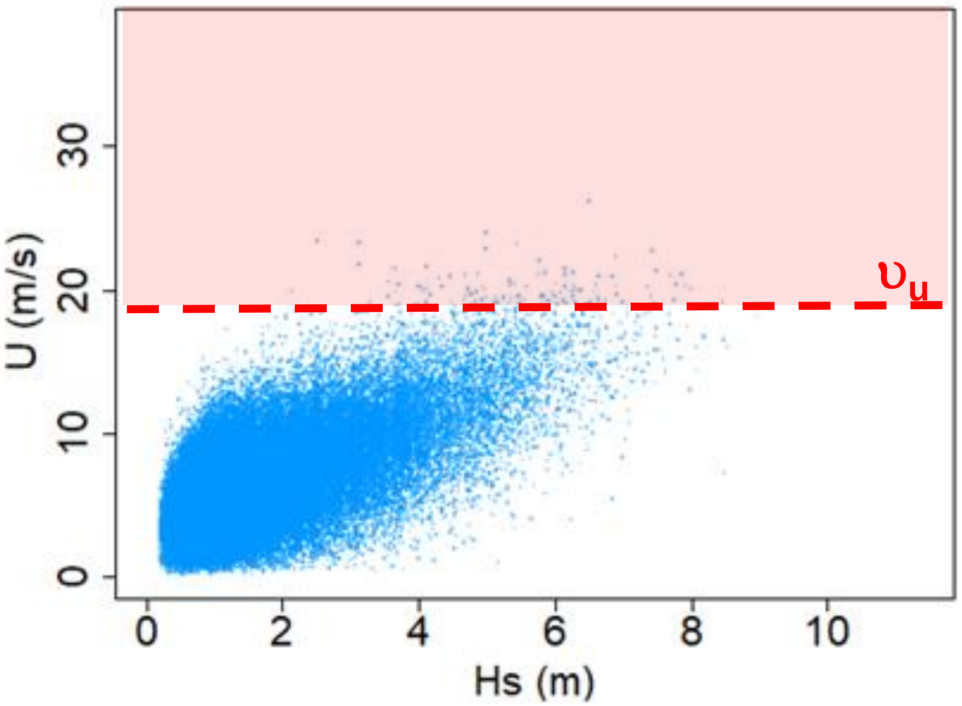
$$U|(Hs = h) = \alpha h + h^{\beta}.Z$$

avec *Z* le résidu indépendant de *Hs* supposé normalement distribué (pour l'estimation)

$\alpha \in [-1{,}1]$

$\beta < 1$

2. Modéliser la **dépendance** des valeurs extrêmes [1]



- Soit (*Hs*,*U*)
- Transformation de Gumbel $-\log(-\log(F_i))\,, i = Hs, U$
- Pour u>υ_u, on suppose

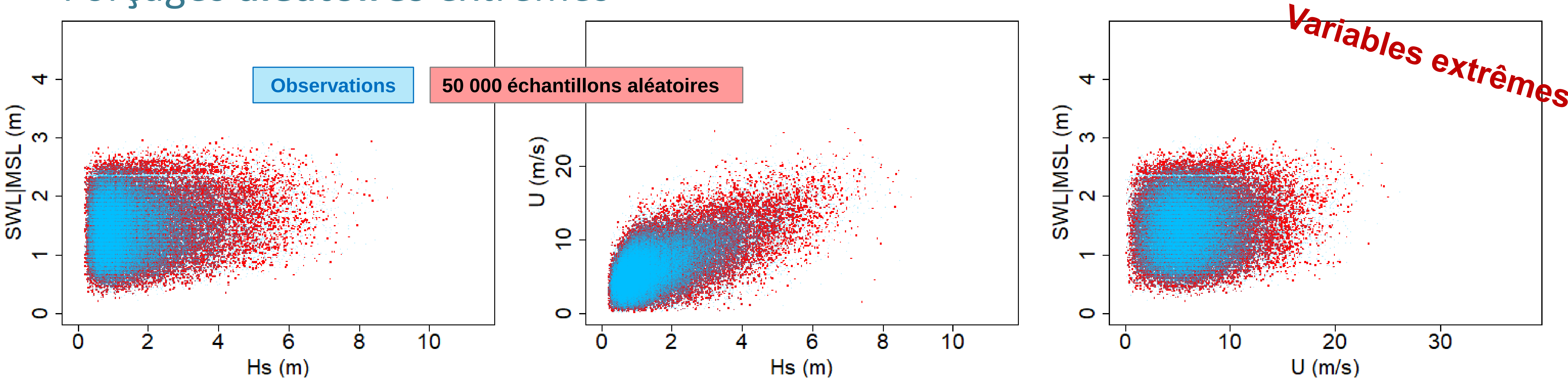
$$Hs|(U = u) = \alpha_u u + u^{\beta_u}.Z$$

avec *Z* le résidu indépendant de *U* normalement distribué (pour l'estimation)

$$\alpha_u \in [-1,1]$$
$$\beta_u < 1$$

[1] méthode semi-paramétrique Heffernan and Tawn (2004)

Forçages **aléatoires** extrêmes



Validation de la génération aléatoire des valeurs extrêmes

$$\bar{\chi} = \lim_{u \to 1} \left(\frac{2\log(P(U > u))}{\log(P(U > u \cap V > u))} - 1 \right)$$

mesure de la dependence asymptotique [1]

Table S1. $\bar{\chi}$ value for the hindcast database. Values in brackets correspond to the bounds of the 95% confidence interval [2]

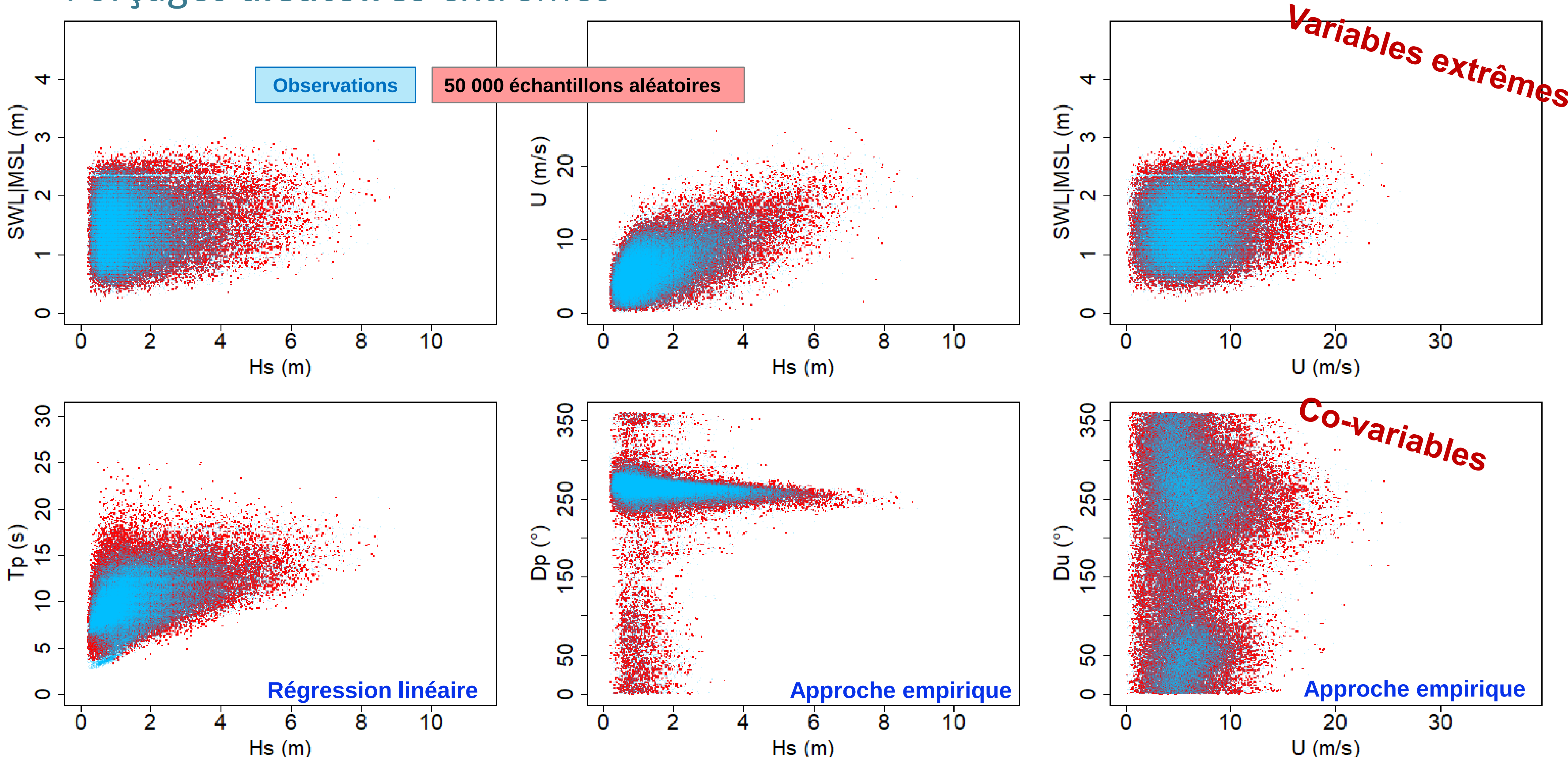
	SWL	*Hs*
Hs	0.33 (0.10, 0.57)	
U	0.28 (0.06, 0.50)	0.46 (0.20, 0.70)

Table S2. $\bar{\chi}$ value for the randomly generated samples. Values in brackets correspond to the bounds of the 95% confidence interval

	SWL	*Hs*
Hs	0.74 (0.42, 1.00)	
U	0.31 (0.08, 0.56)	0.48 (0.22, 0.76)

[1] Coles (1999); [2] Rohmer et al. (2022)

Forçages **aléatoires** extrêmes



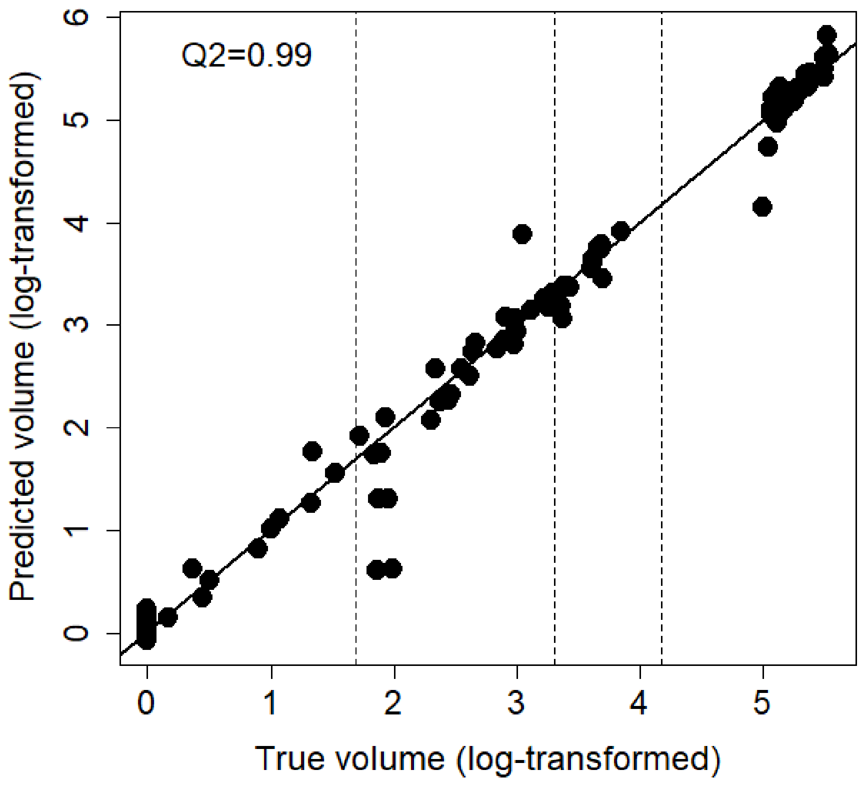
Estimer l’influence respective forçages + SLR sur l’occurrence de l’inondation	
Méthode: analyse globale de sensibilité	
Difficulté 1: tenir compte de la dépendance	Shapley eff.
Difficulté 2: adapté au problème d’occurrence	Target Shap.
Difficulté 3: générer des **forçages extrêmes + dépendance**	MEVA
Difficulté 4: approches Monte-Carlo versus temps de calcul de calcul	Métamodèle krigeage **[1]**

- **Objectif:** on veut prédire *Y** pour des nouvelles conditions *x** **SANS** faire tourner le code de calcul
- **Hypothèse:**
  - la distribution de *Y** dépend des *n* résultats de simulation déjà faits $\boldsymbol{Y}_n = \boldsymbol{y}$
  - la distribution de *Y** est gaussienne $Y^*|\{\boldsymbol{Y}_n = \boldsymbol{y}\} \sim N(m, \Sigma)$
- Avec $m = \boldsymbol{K}_{Y^*,Y_{\boldsymbol{n}}} \boldsymbol{K}^{-1}_{Y^*,Y_{\boldsymbol{n}}} \boldsymbol{y}$ et $\Sigma = \boldsymbol{K}_{Y^*,Y^*} - \boldsymbol{K}_{Y^*,Y_n} \boldsymbol{K}^{-1}_{Y^*,Y_n} \boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}_{Y^*,Y_n}$
- Et la matrice de covariance $\boldsymbol{K} = \left(k(x_i, x_j)\right)_{1 \leq i,j \leq n}$

[1] Rasmussen and Williams 2006

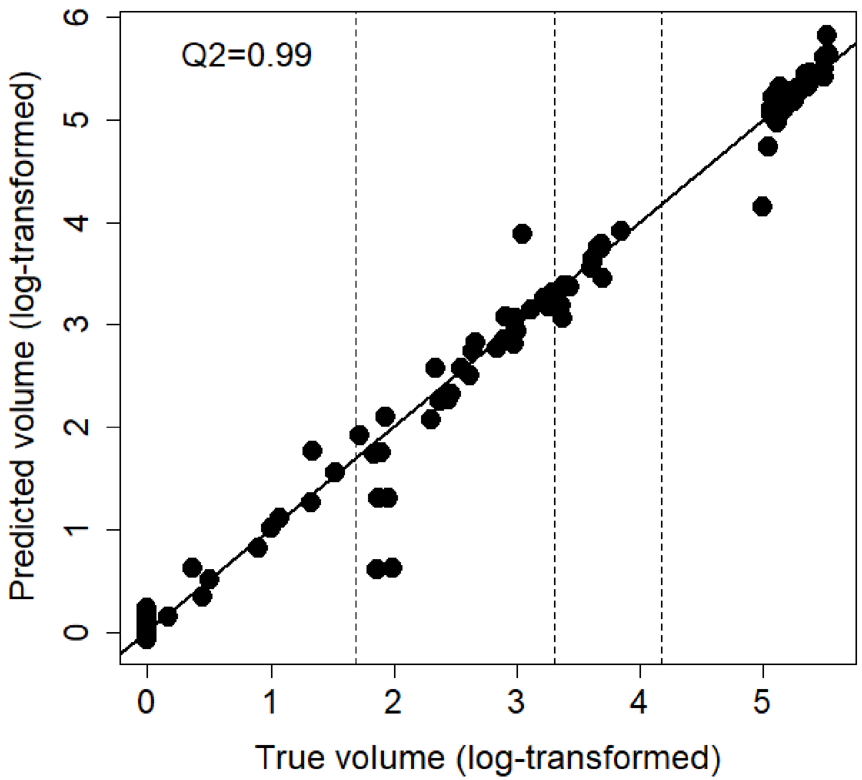
Démarche pour gérer **l'incertitude du métamodèle**

1. Validation croisée LOO



Démarche pour gérer **l'incertitude du métamodèle**

1. Validation croisée LOO



2. Propagation de l'erreur du Gp

Etape (1) Génération de N échantillons aléatoires des conditions $\mathbf{X}_i$ (forçages météo-marins et SLR)

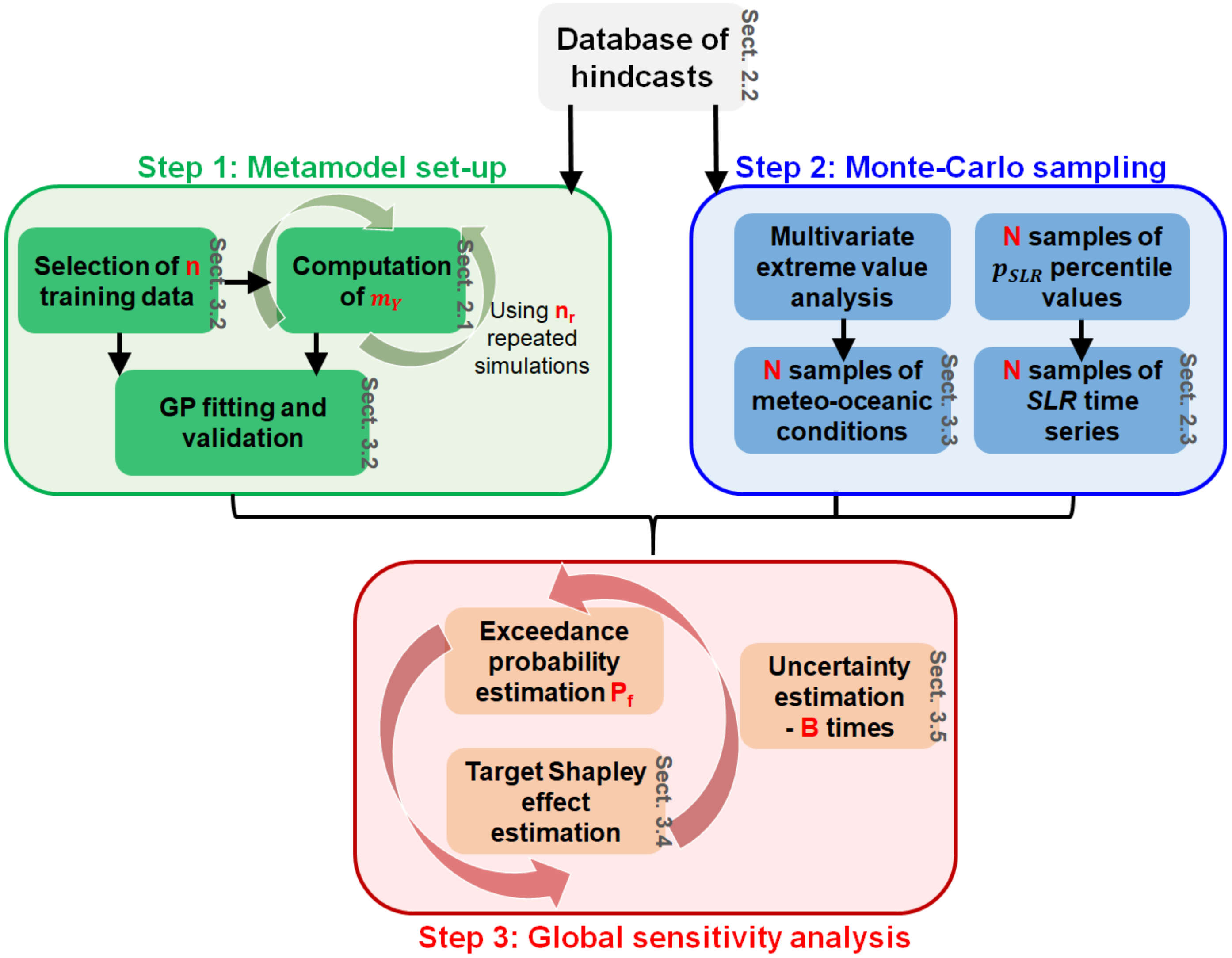
Etape (2) Génération d'une trajectoire conditionnelle $\widetilde{\mathrm{Gp}}$

Etape (3) Calcul de la quantité d'intérêt Q avec $\tilde{\mathbf{Y}} = \widetilde{\mathrm{Gp}}\,(\mathbf{X}_i)$

Refaire Etapes 1-3 (B fois)

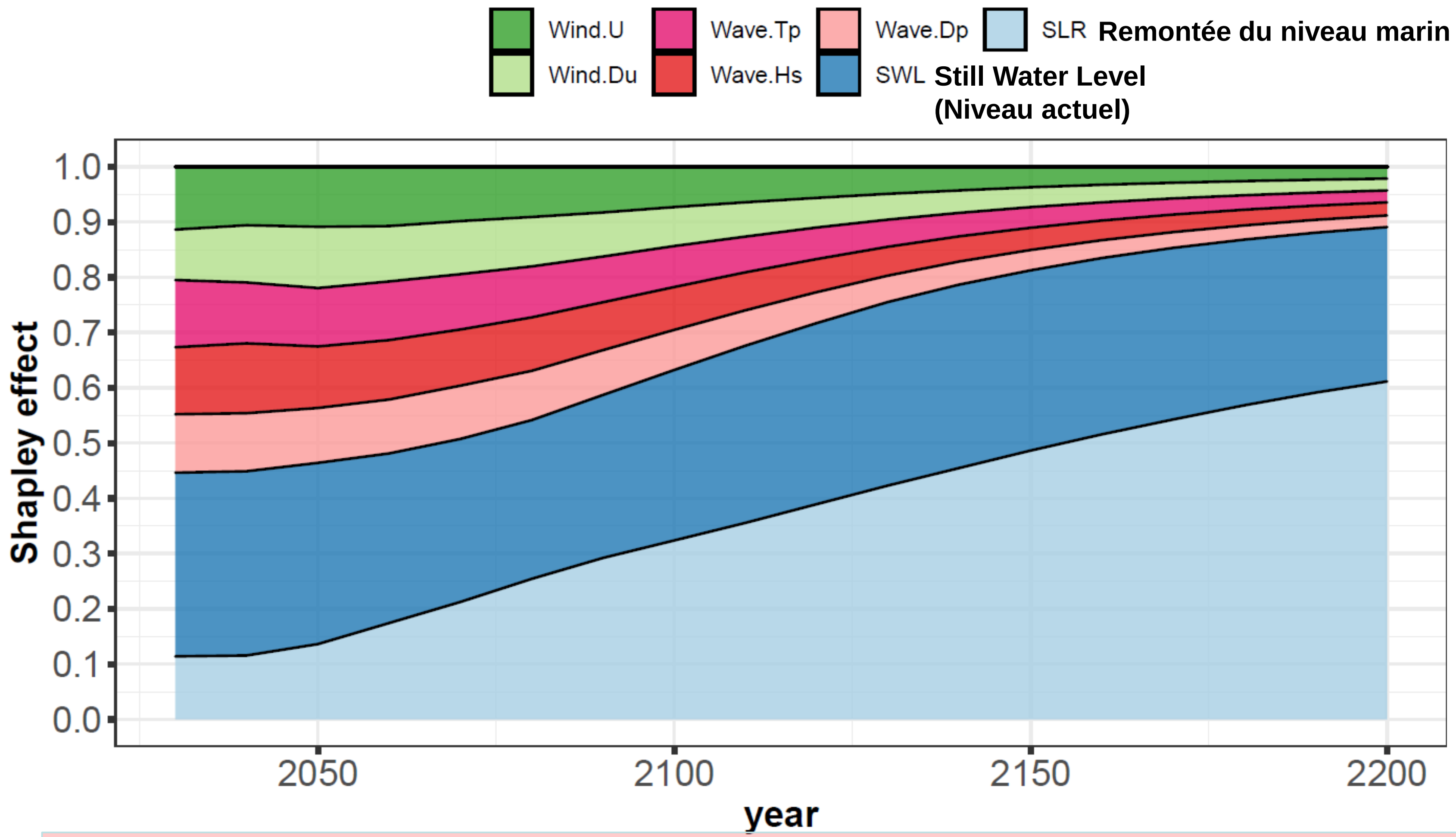
Résultat: B valeurs Q (synthétisées par min/max de Q)

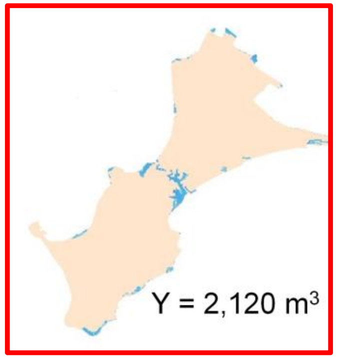
Démarche **globale** **[1]**



[1] Rohmer et al. (2022)

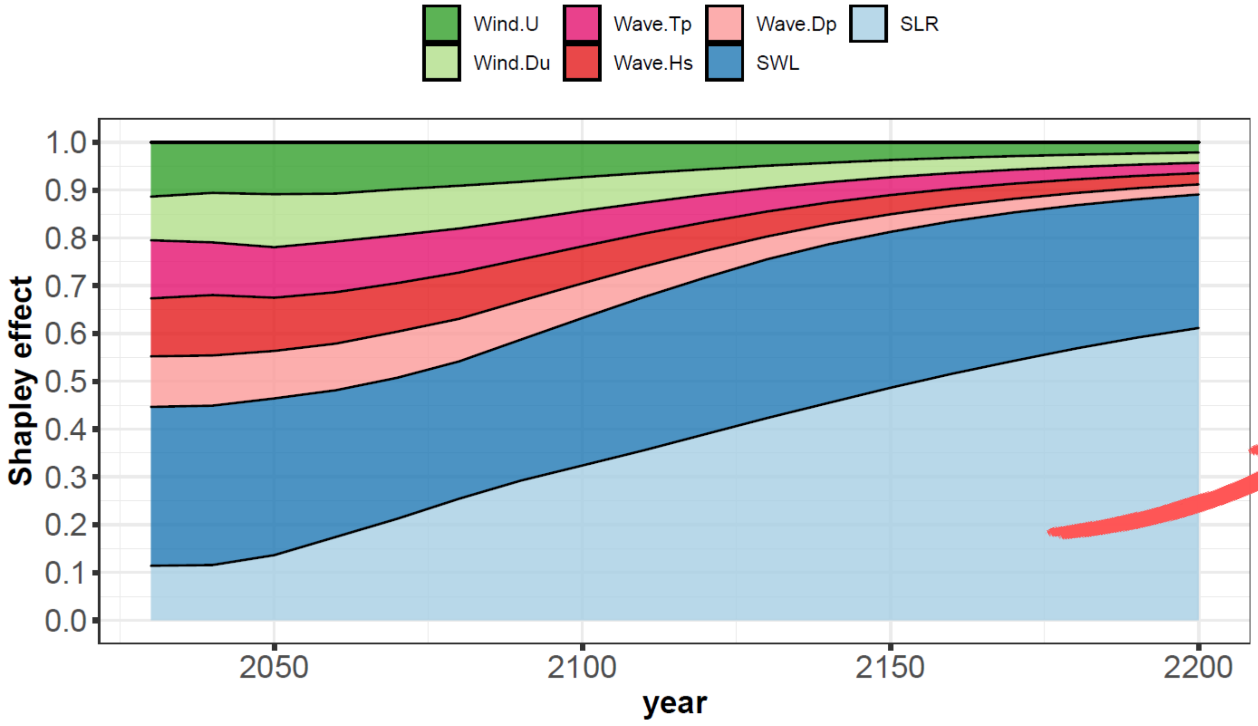
Influence sur **{Y>Yc}**, Yc=**2000m3**, **RCP4.5**

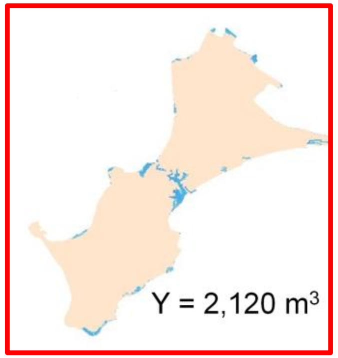




50 000 échantillons aléatoires avec l'estimateur 'data given' de **[Broto et al. (2020)]** (5 voisins)

Influence sur **{Y>Yc},** Yc=**2000m3**, **RCP4.5**



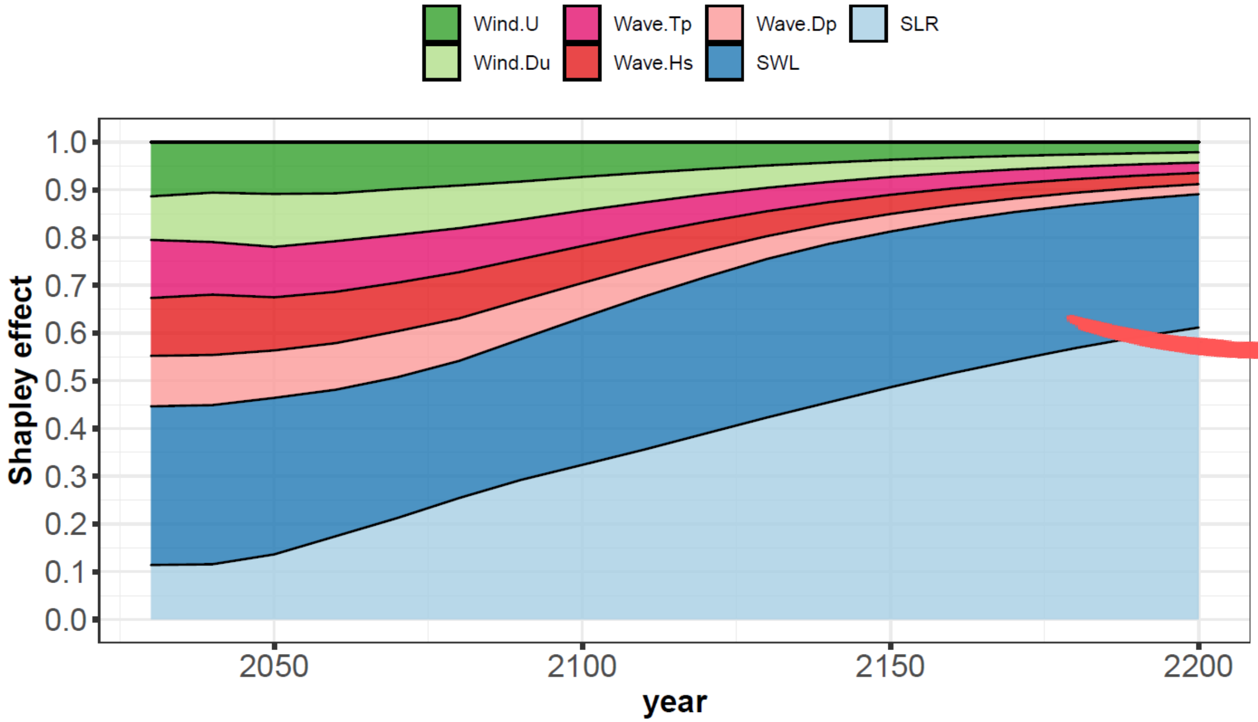


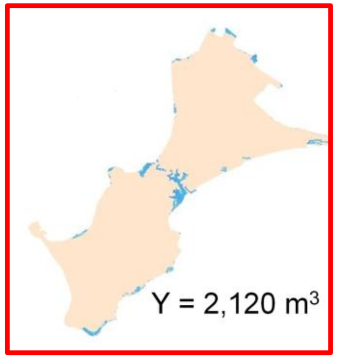
Influence de SLR

- **Dès le court terme**
- **Accélération jusqu'à 2100**
- **Puis linéaire**

RISCOPE

Influence sur **{Y>Yc},** Yc=**2000m3**, **RCP4.5**



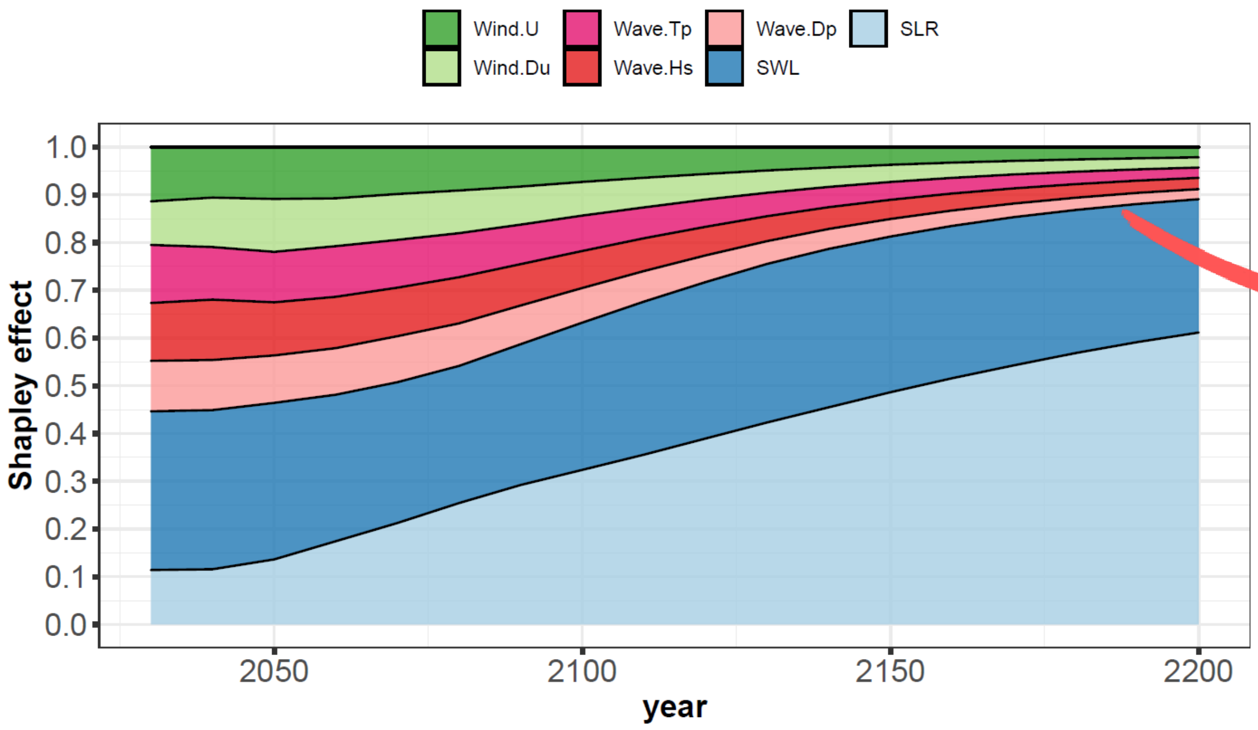


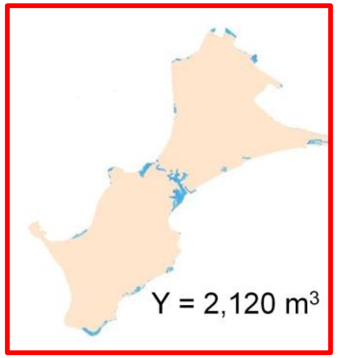
Influence de SWL

- **Quasi-constant au cours du temps**
- **~ 30%**

RISCOPE

Influence sur **{Y>Yc}**, Yc=**2000m3**, **RCP4.5**





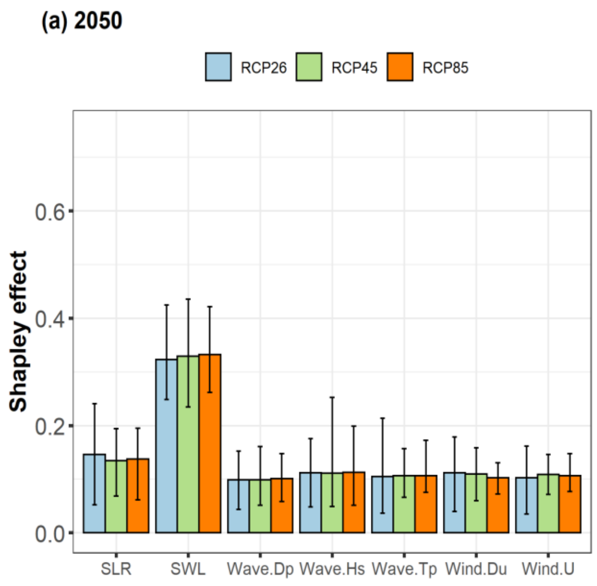
Influence de vagues/vents

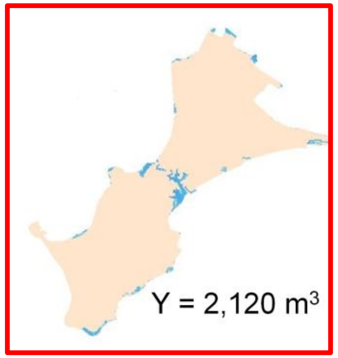
- **Court terme: modérée**
- **Long terme: niveau quasi négligeable**

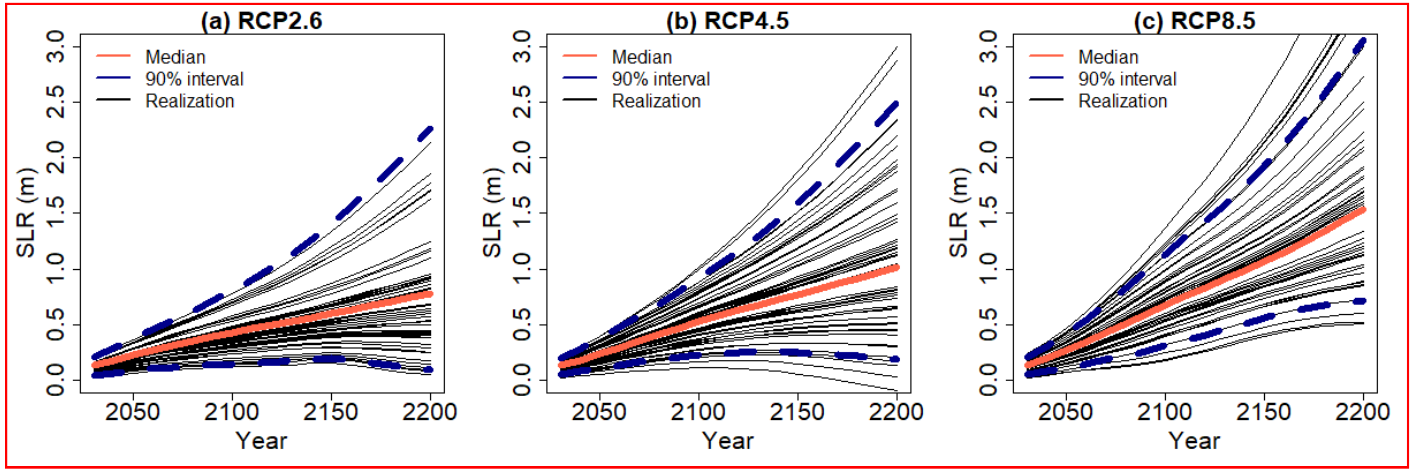
RISCOPE

Influence sur **{Y>Yc}**, Yc=**2000m3**, Effet de **RCP [1]**

Confidence interval
using 50 replicates



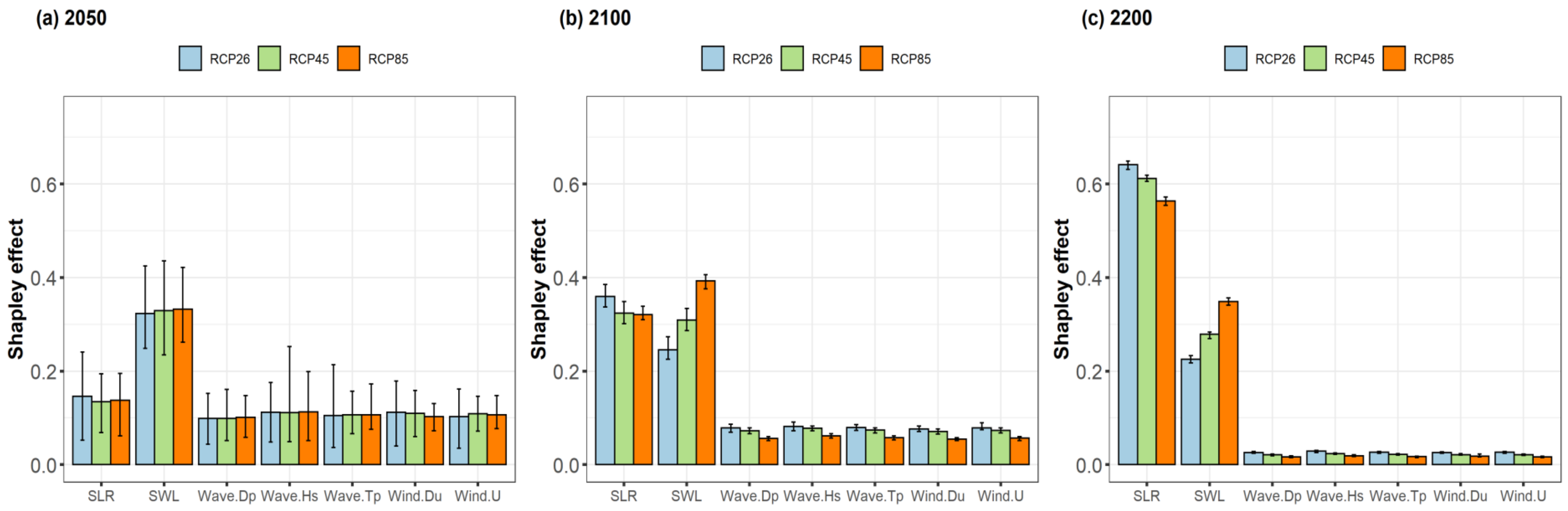




[1] Rohmer et al., 2022

Influence sur **{Y>Yc}**, Yc=**2000m3**, Effet de **RCP** **[1]**

Confidence interval using 50 replicates



de RCP2.6 à RCP8.5, l'influence de SLR est réduite et compensée par SWL (niv. actuel)

RISCOPE

[1] Rohmer et al., 2022

Résumé

- Projections futures probabilistes de la submersion + analyse de sensibilité **FAISABLES** grâce à la mise en place du **métamodèle**
  - **Influence claire de SLR** (dès le court/moyen terme)
  - Importance **décroissante** des facteurs vagues/vents (voire négligeable après 2100)
  - **L'influence de l'incertitude** du métamodèle a peu d'impact

- **A explorer:** impact des hypothèses de modélisation (seuil, scénario RCP, bathymétrie, etc.) → « sensibilité de la sensibilité » **[1]**

RISCOPE

[1] Razavi et al. (2021)

Merci pour votre attention!

Partitioning the contributions of dependent offshore forcing conditions in the probabilistic assessment of future coastal flooding

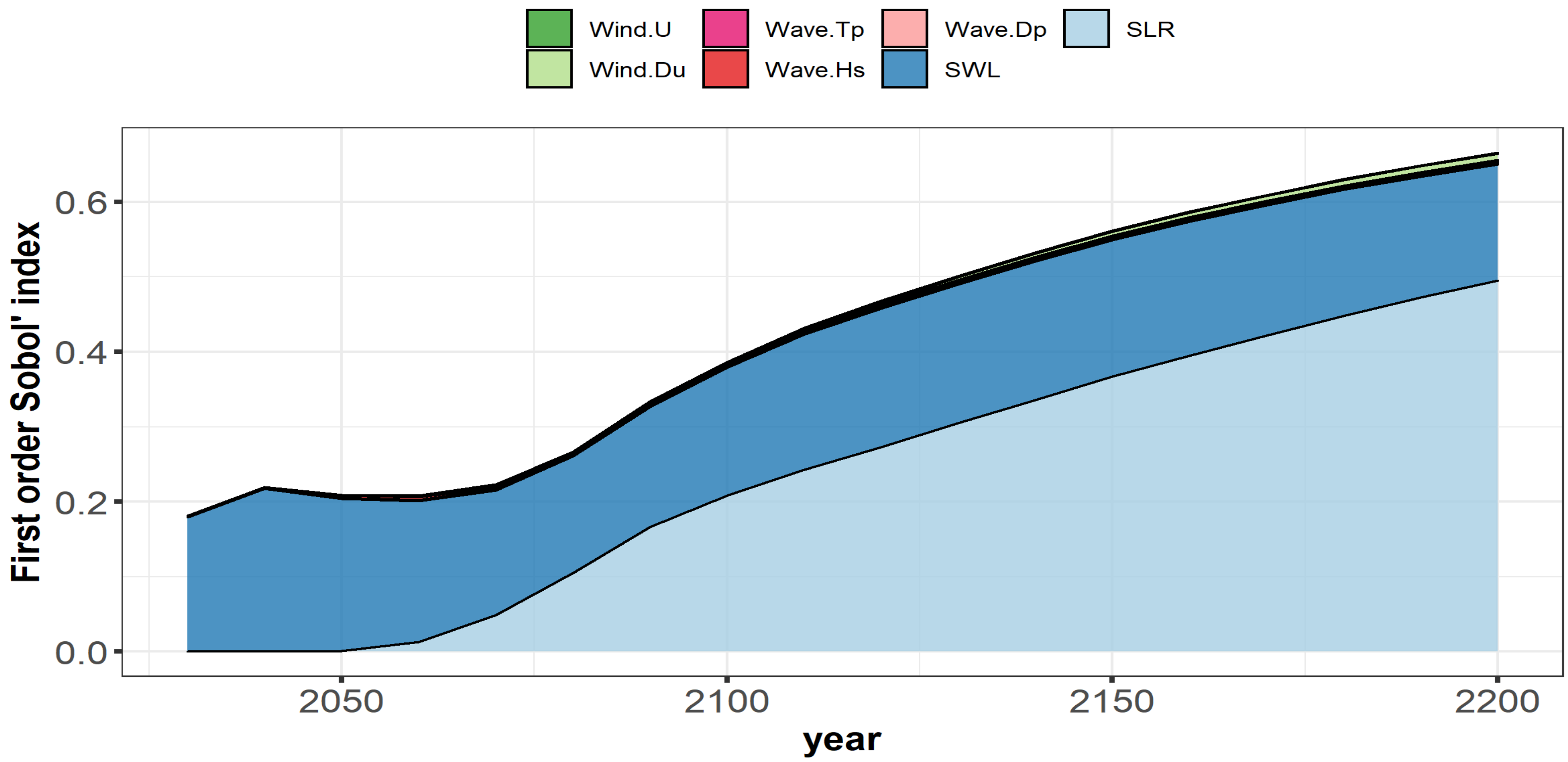
Jeremy Rohmer[1], Deborah Idier[1], Remi Thieblemont[1], Goneri Le Cozannet[1], and François Bachoc[2]

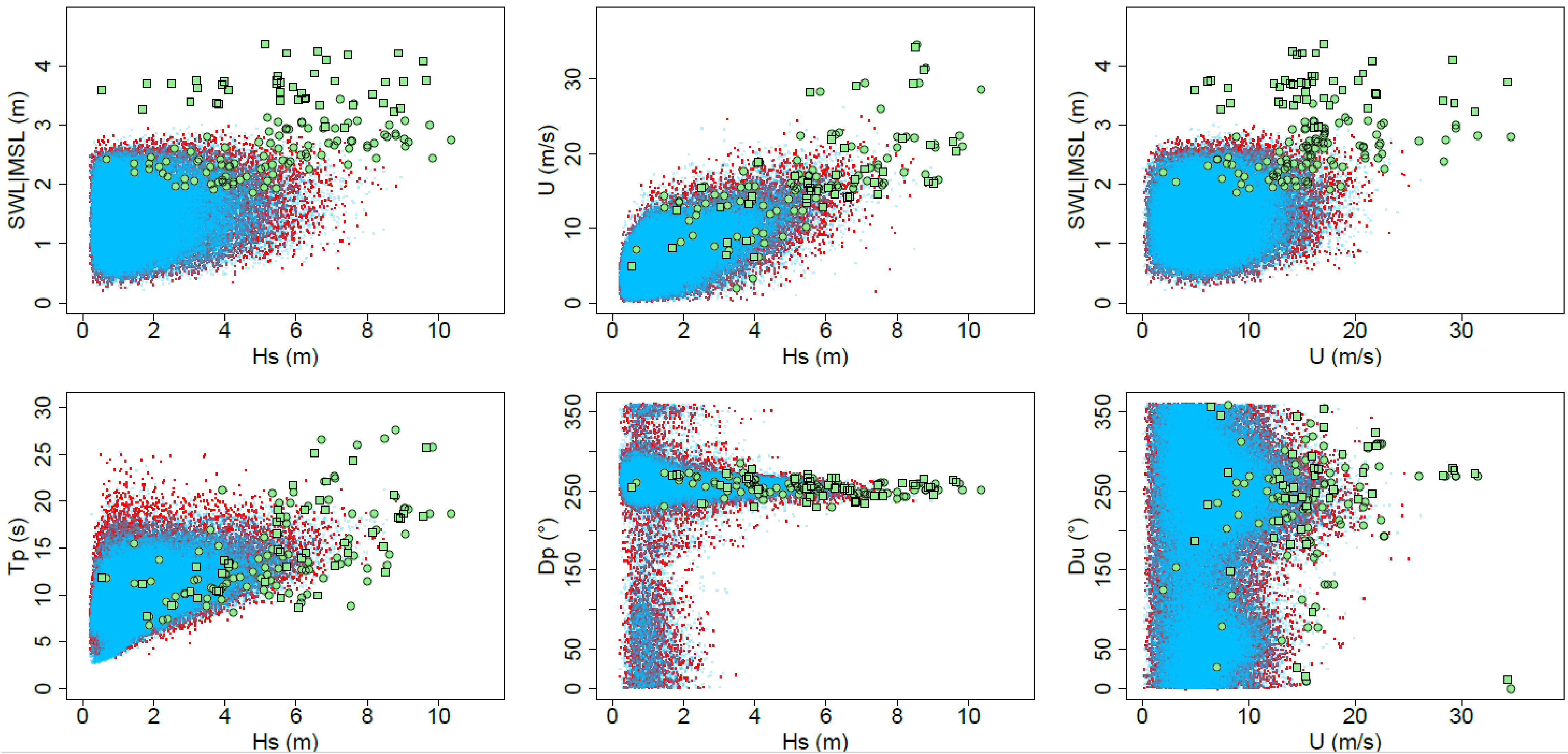
[1]BRGM, 3 av. C. Guillemin, 45060 Orléans CEDEX 2, France
[2]Institut de Mathématiques de Toulouse, 118 Rte de Narbonne, 31400 Toulouse, France

Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 22, 3167–3182, 2022
https://doi.org/10.5194/nhess-22-3167-2022
© Author(s) 2022. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Annexes

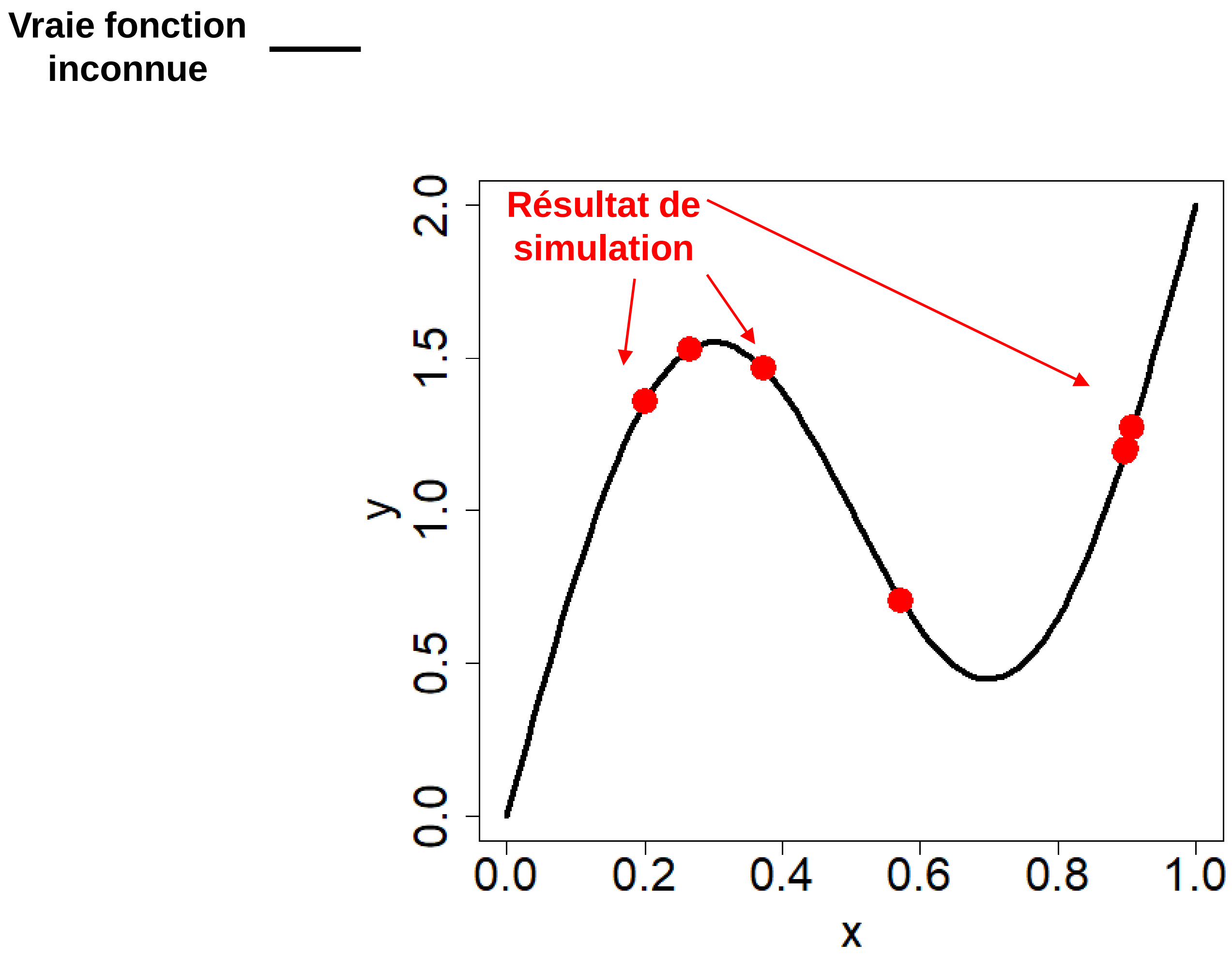
Analyse « sans dépendance »




SWL|MSL (m)
Hs (m)
U (m/s)
Hs (m)
SWL|MSL (m)
U (m/s)
Tp (s)
Hs (m)
Dp (°)
Hs (m)
Du (°)
U (m/s)

Ingrédient 2: trajectoires aléatoires du Gp

Cas jouet illustratif



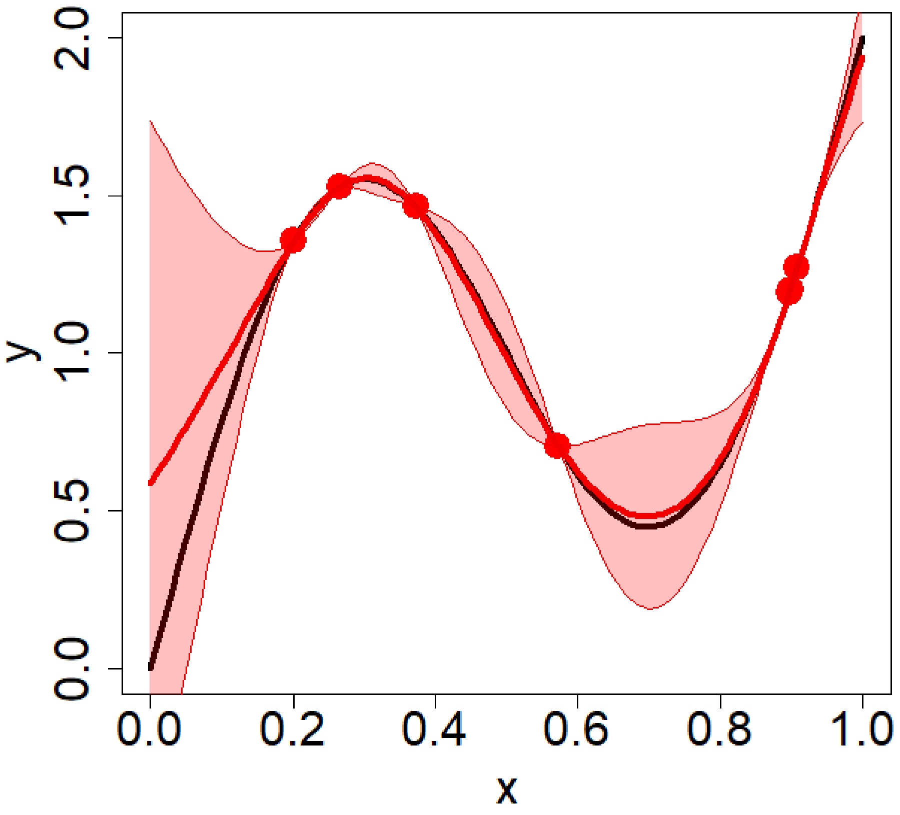
Ingrédient 2: trajectoires aléatoires du Gp

Cas jouet illustratif

Vraie fonction inconnue

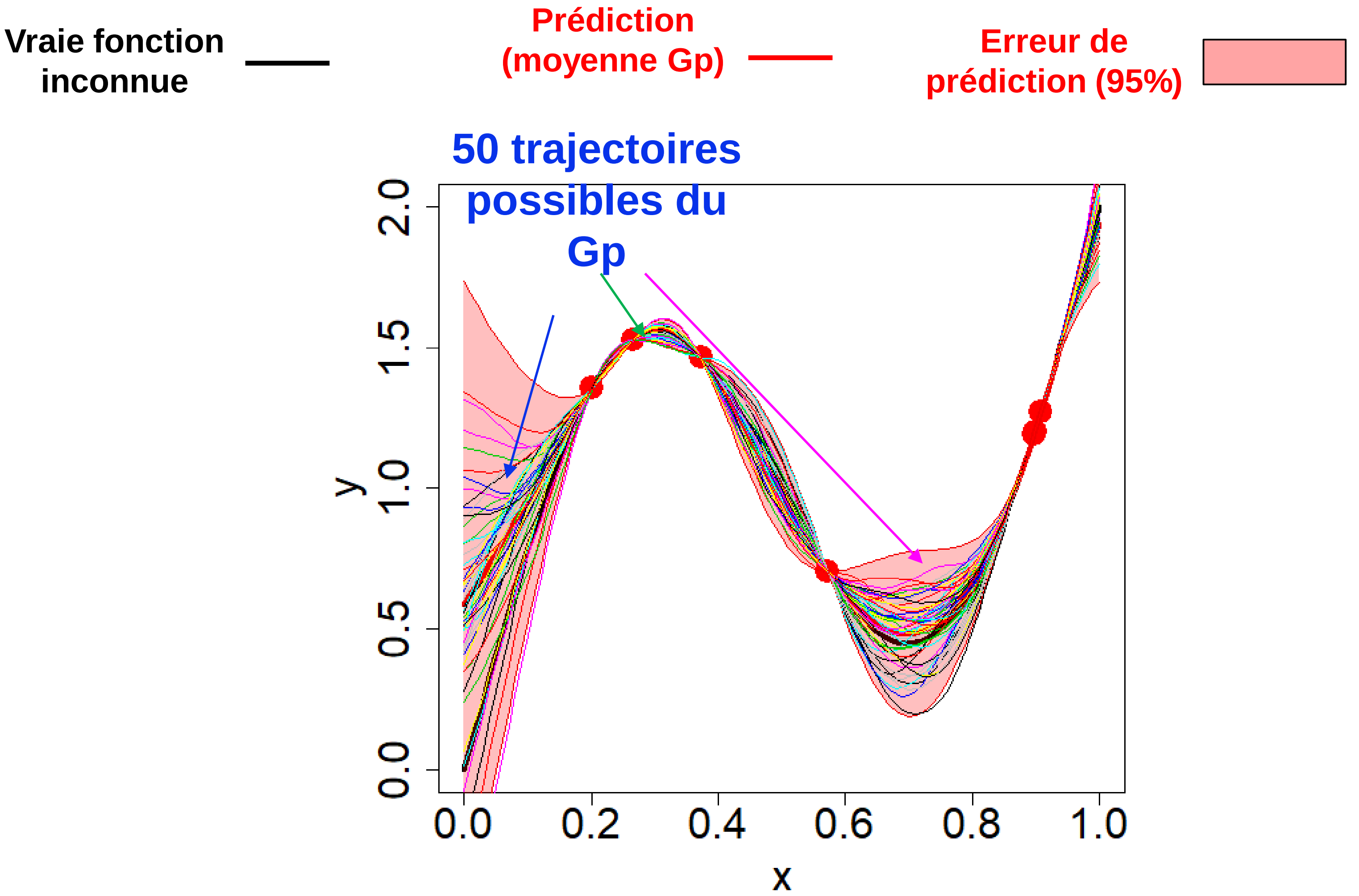
Prédiction (moyenne Gp)

Erreur de prédiction (95%)

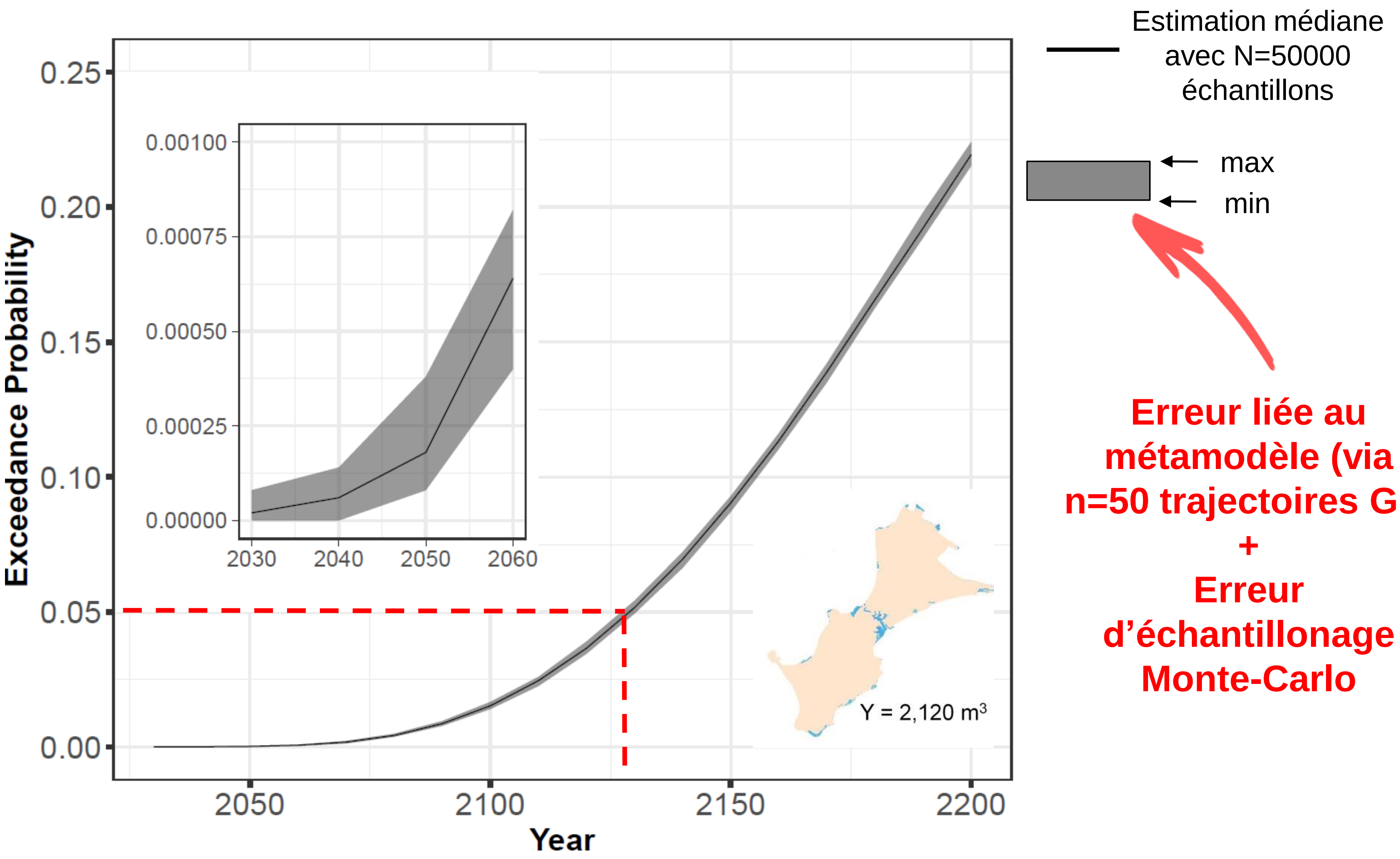


Ingrédient 2: trajectoires aléatoires du Gp

Cas jouet illustratif



Evolution de la **probabilité Pf {Y>2000 m3}, RCP4.5**

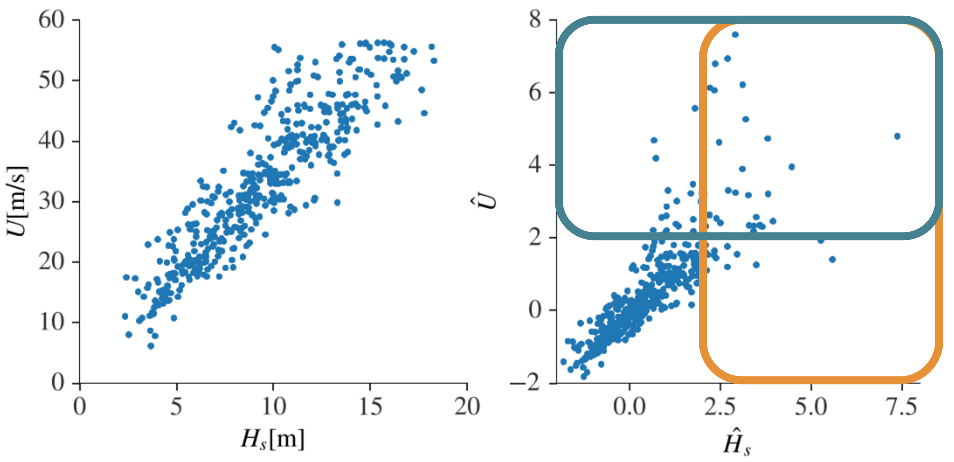


Erreur liée au métamodèle (via n=50 trajectoires Gp)
+
Erreur d'échantillonage Monte-Carlo

RISCOPE

Method: Conditional multivariate extremes model

1. Probability integral transformation of variables to Gumbel scale
2. Estimate parameters(a,b) conditional on one component exceeding common threshold
3. Sample x_j from standard Gumbel distribution
4. Sample residual Z_{-j} from its empirical distribution independent of x_j
5. Obtain X_{-j} and back-transform to original scale based on procedure 1



$$(X_{-j}|X_j = x_j) = a_{-j}x_j + x_j^{b_{-j}} Z_{-j}$$

$\Longleftrightarrow$

$$Z_{-j} = \frac{X_{-j} - a_{-j}x_j}{x_j^{b_{-j}}}$$

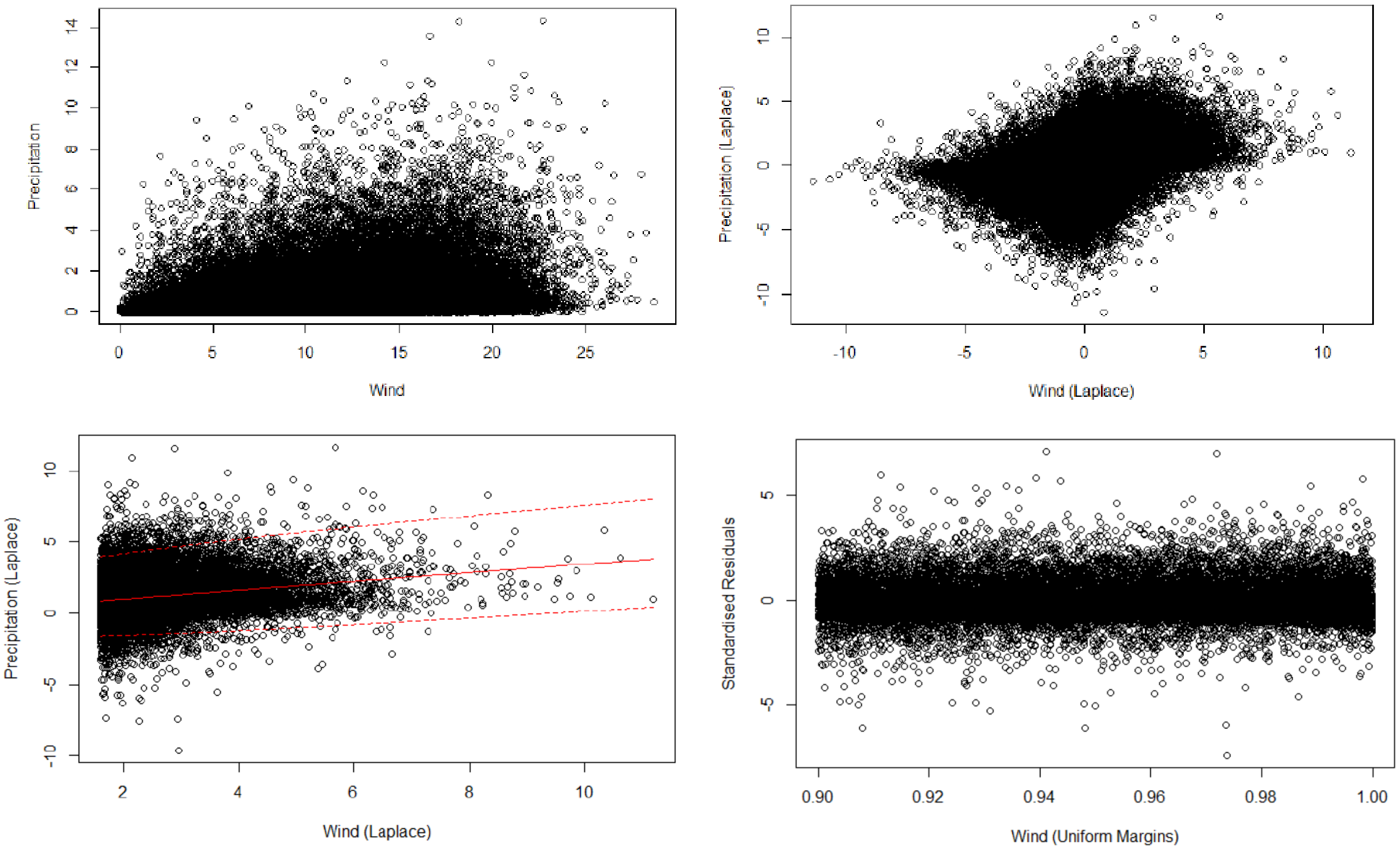
For estimation, form of Z_{-j} is Gaussian

For simulation, Z_{-j} is empirical

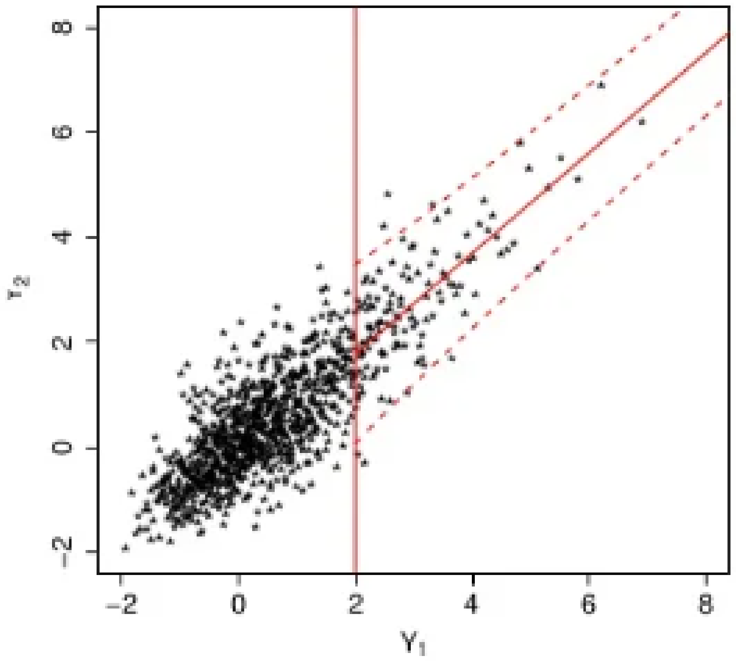
Z_{-j} should be independent of x_j

Original Data

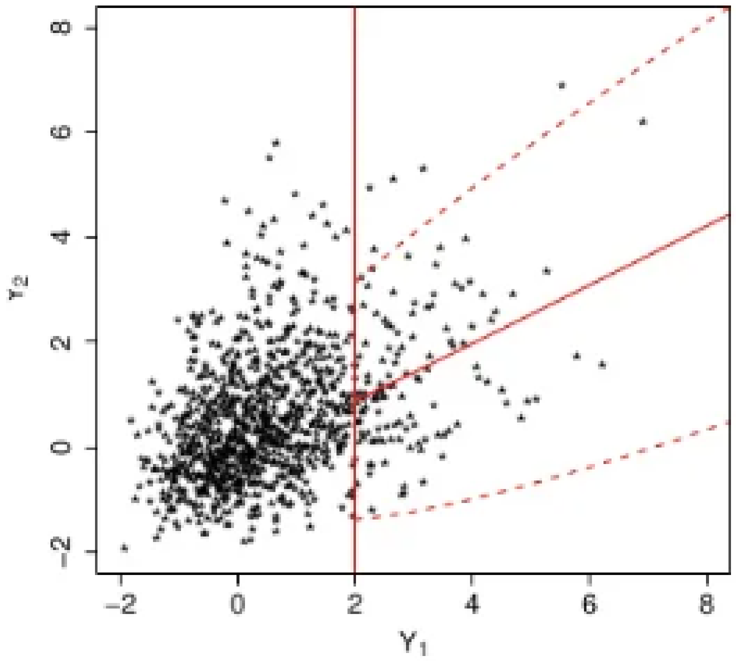
Laplace



α=0.95 β=-0.26

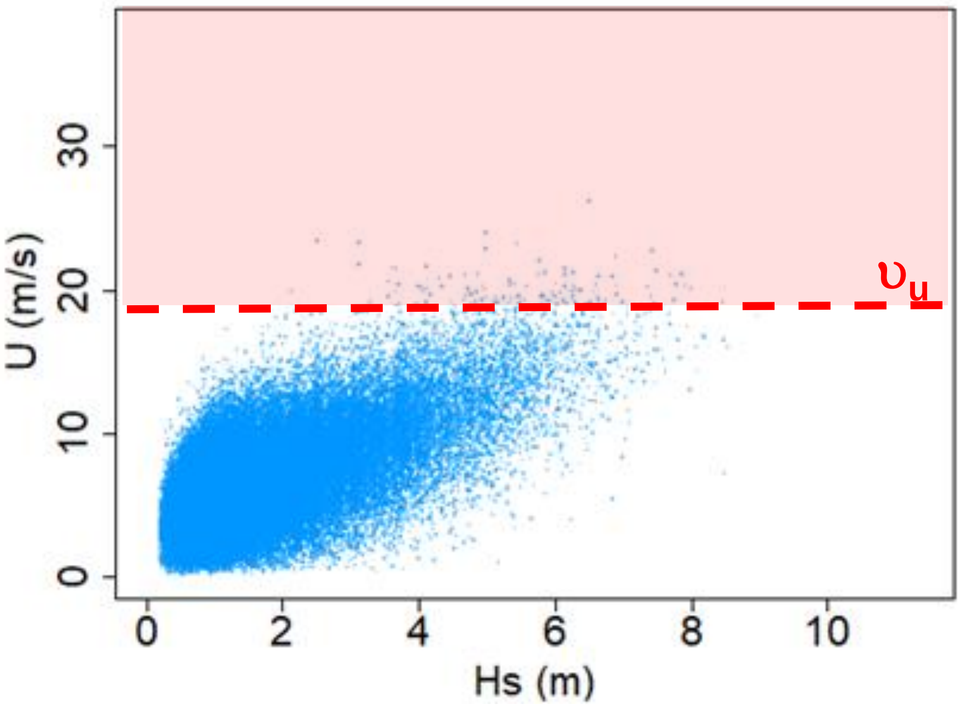


α=0.60 β=0.40



- Simuler X d'une loi Laplace standard conditionnellement X>υ
- Simuler indépendamment Z estimé à partir de la distribution empirique
- Evaluer $Y = \alpha_Y X + X^{\beta_Y} Z$
- Transformation inverse sur l'échelle physique
- Répéter

2. Modéliser la **dépendance** des valeurs extrêmes **[1]**



- Soit (*Hs*,*U*)
- Transformation de Gumbel $-\log(-\log(F_i))\,, i = Hs, U$
- Pour u>υ_u, on suppose

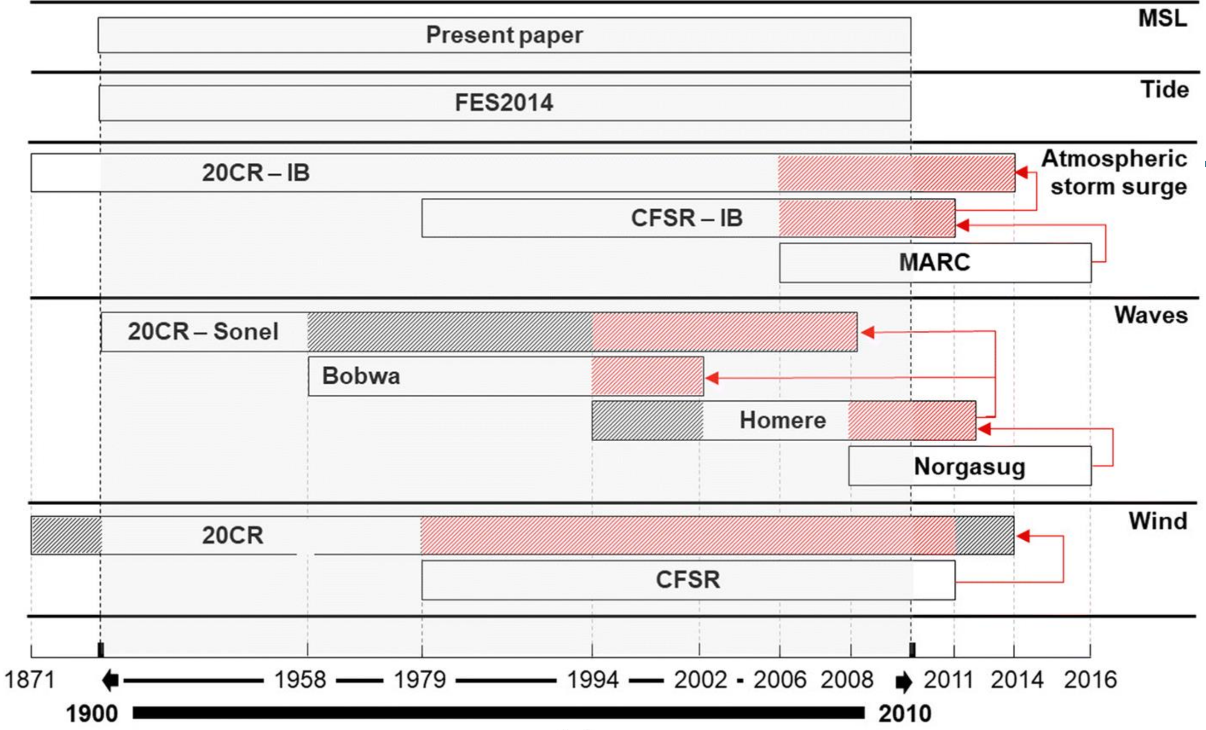
$$Hs|(U = u) = \alpha_u u + u^{\beta_u}.Z$$

avec *Z* le résidu indépendant de *U* normalement distribué (pour l'estimation)

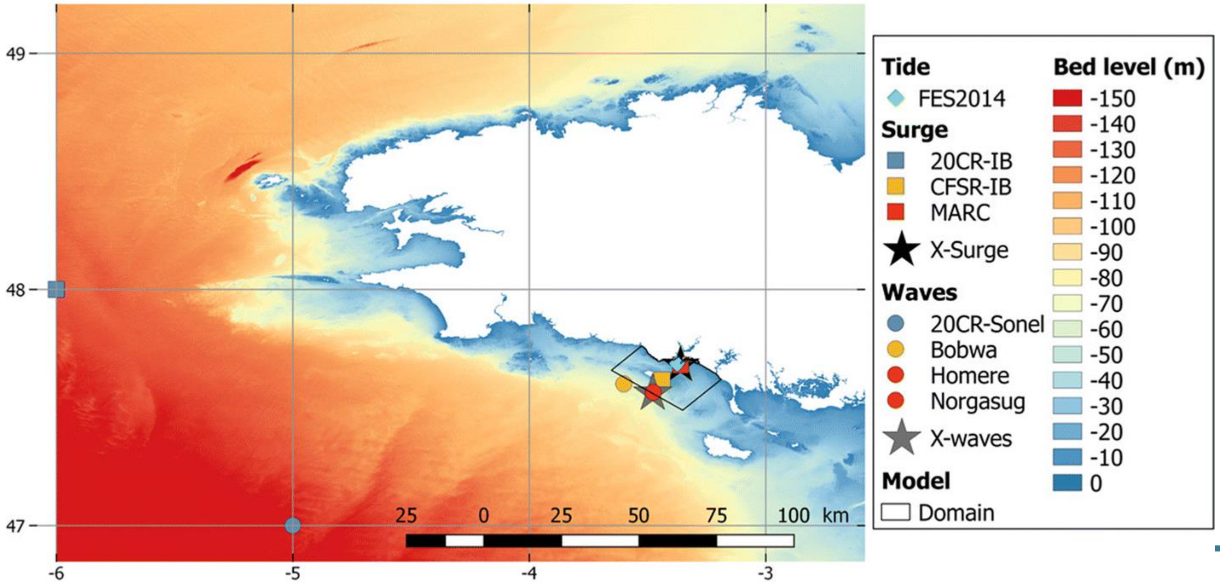
$$\alpha_u \in [-1,1]$$
$$\beta_u < 1$$

- **Dépendance** asymptotique (α=1) et **indépendance** asymptotique (α<1)
- Plusieurs structures de dépendance 'classiques' en **cas particuliers**
- Généralisable à **dimension > 2**

[1] méthode semi-paramétrique Heffernan and Tawn (2004)


MSL
Present paper
Tide
FES2014
Atmospheric storm surge
20CR – IB
CFSR – IB
MARC
Waves
20CR – Sonel
Bobwa
Homere
Norgasug
Wind
20CR
CFSR
1871
1958
1979
1994
2002
2006
2008
2011
2014
2016
1900
2010

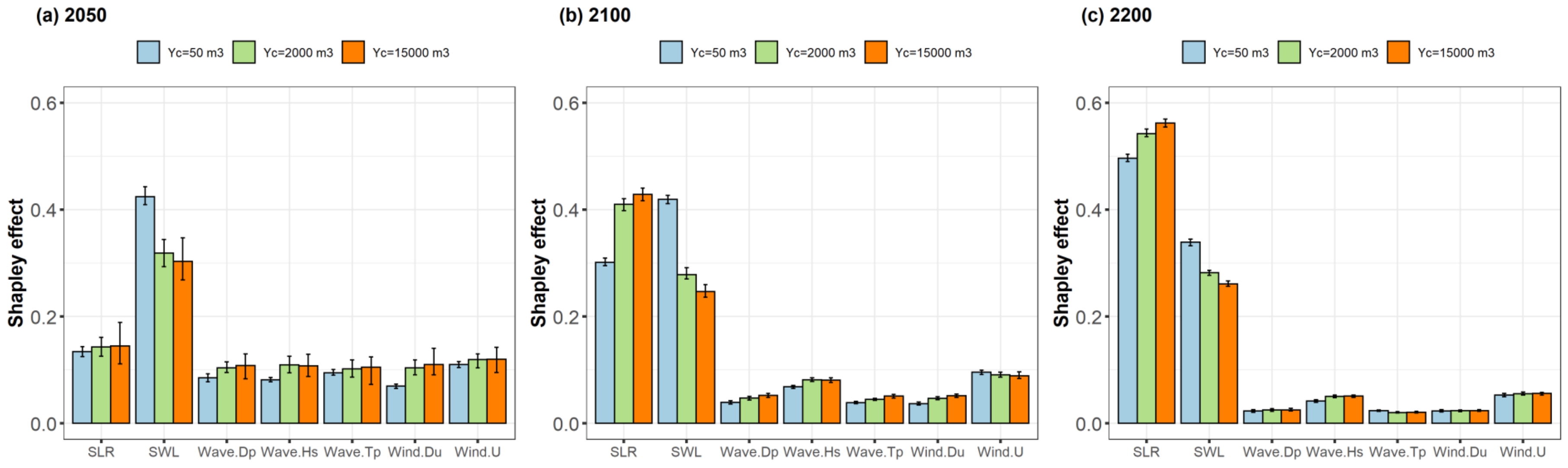
(a)


Tide
FES2014
Surge
20CR-IB
CFSR-IB
MARC
X-Surge
Waves
20CR-Sonel
Bobwa
Homere
Norgasug
X-waves
Model
Domain
Bed level (m)
-150
-140
-130
-120
-110
-100
-90
-80
-70
-60
-50
-40
-30
-20
-10
0
25 0 25 50 75 100 km
49
48
47
-6
-5
-4
-3

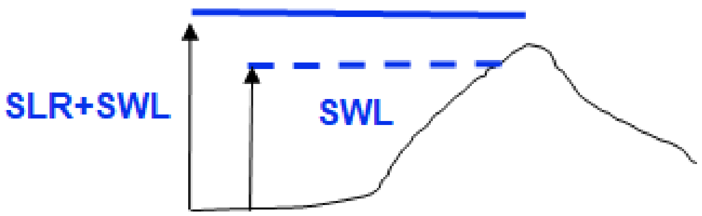
(b)

Effet du seuil Yc [1]

Confidence interval using 50 replicates



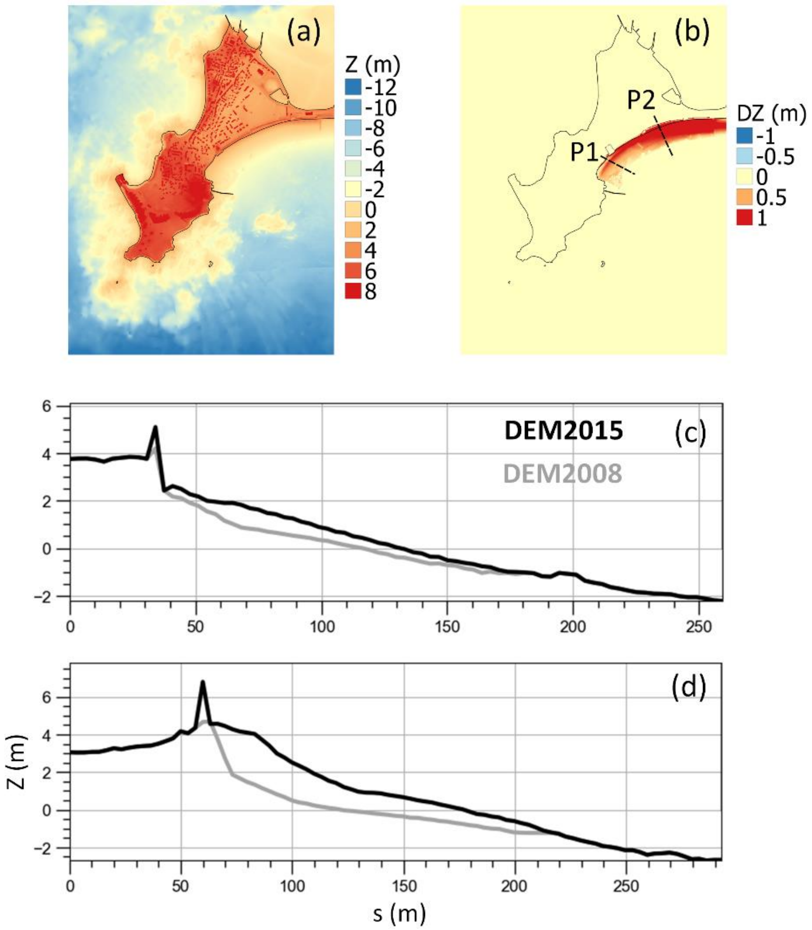
Plus Yc est petit,plus l’influence de SLR est petite
SLR a un effet offset



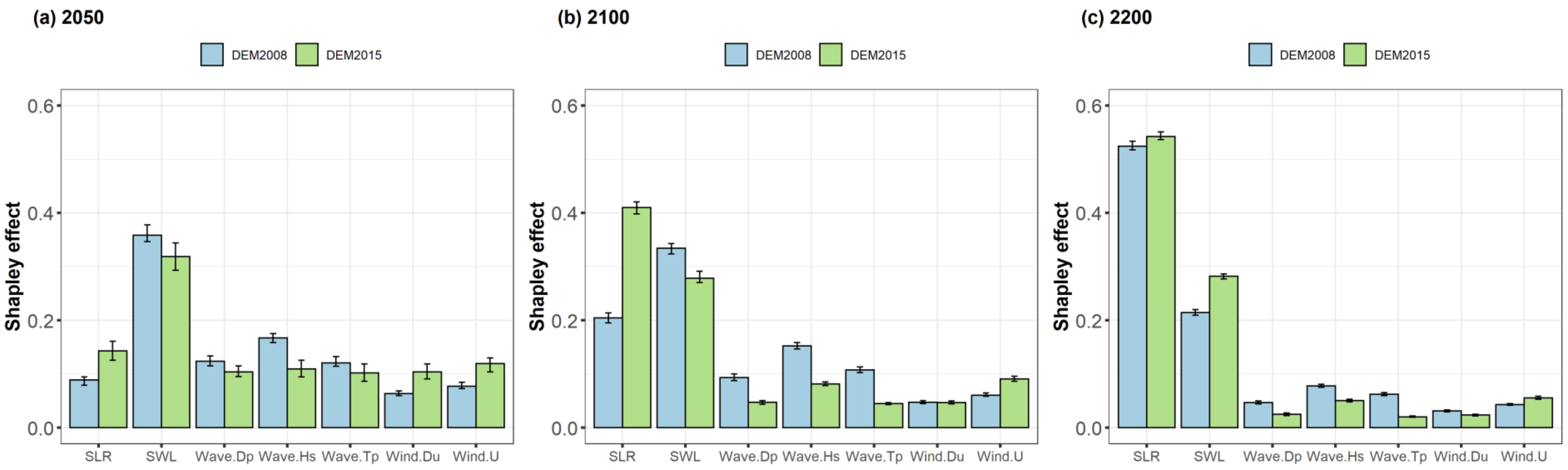
Cas de référence: Seuil Yc=2000, scénario RCP4.5, Bathymétrie DEM2015, wave stochas.: Q50

[1] Rohmer et al., 2021

Effet de la bathymétrie 2015 - 2008



Effet bathymétrie [1]



Cas de référence: Seuil Yc=2000, scénario RCP4.5, **Bathymétrie DEM2015**, wave stochas.: Q50

[1] Rohmer et al., 2021

4 Axiomes :

- 1. (Efficacité) La somme des valeurs réparties doit être égale à la production totale
- 2. (Symétrie) Si, pour toute coalition, l’apport marginal de deux joueurs est égale, leur part doit être égale.
- 3. (Joueur nul) Si, pour toute coalition, l’apport marginal d’un joueur est nul, sa part est nulle.
- 4. (Additivité) Si un jeu peut être décomposé en deux sous-jeux distincts, les valeurs de Shapley de ce jeu sont la somme de ceux