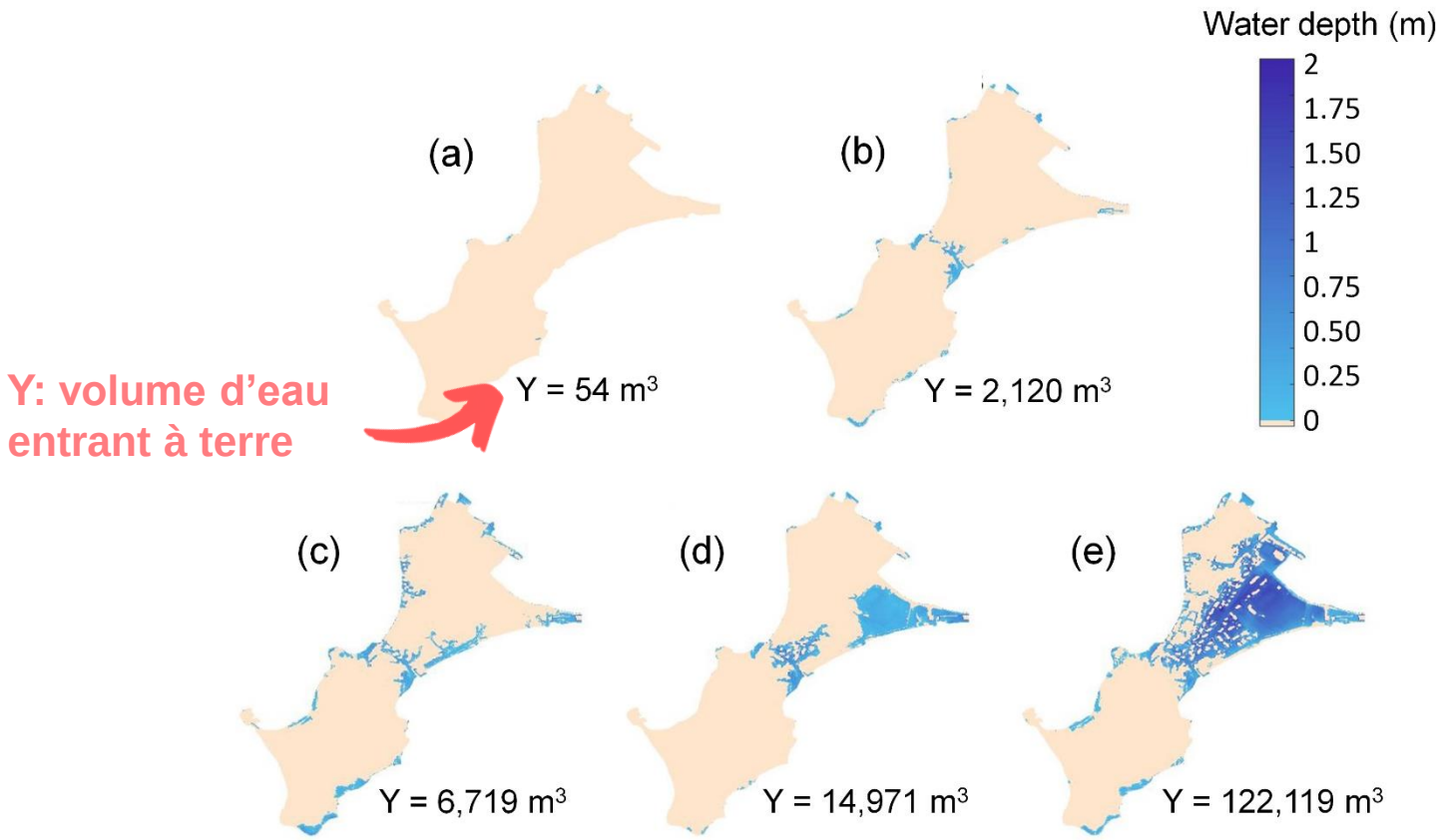
Projections futures probabilistes de la submersion à Gâvres sous l'effet de la remontée du niveau marin

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

* brgm Geoscience for a sustainable Earth § INSTITUT de MATHEMATIQUES de TOULOUSE

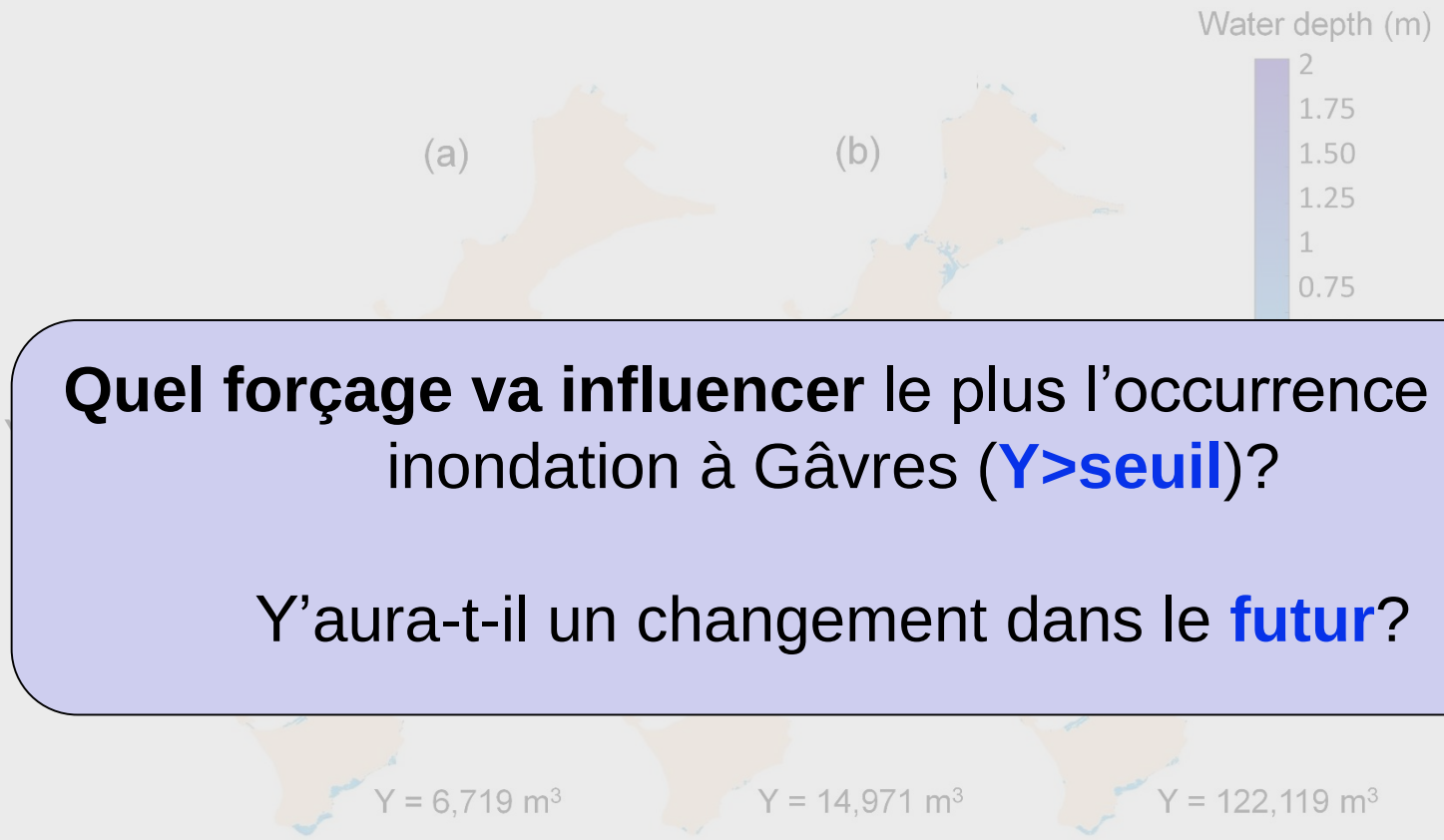
Séminaire de restitution du projet ANR RISCOPE, 1-2 février 2022

Motivation



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

Motivation

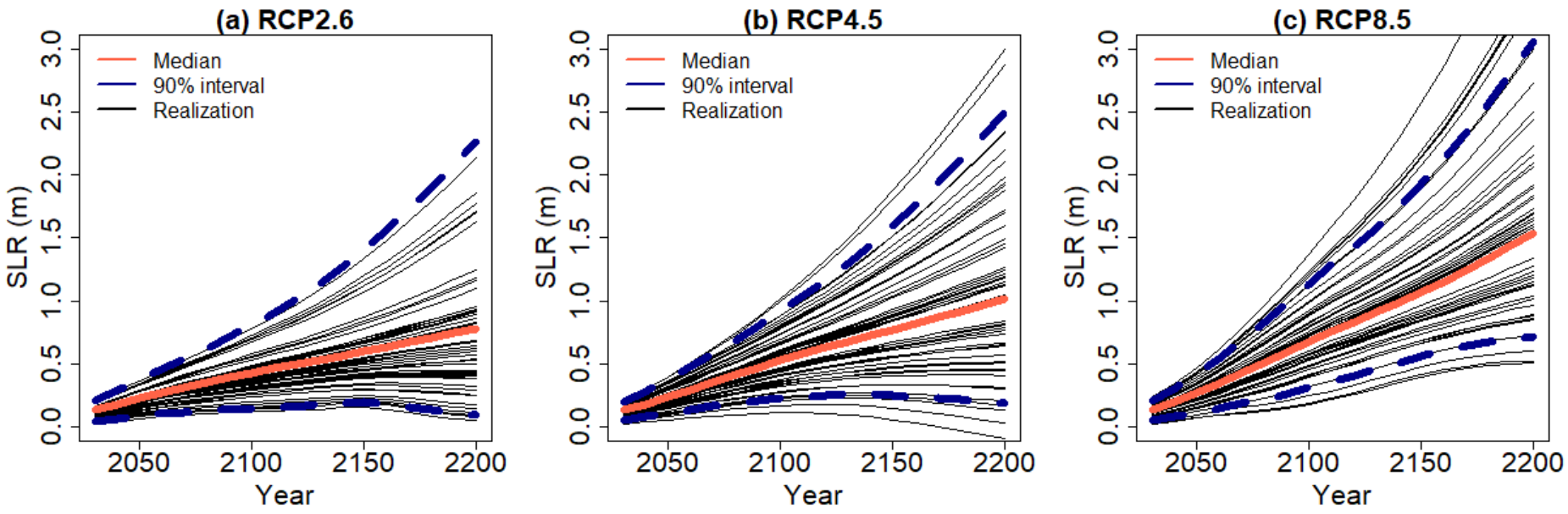


Quel forçage va influencer le plus l'occurrence d'une inondation à Gâvres (**Y>seuil**)?

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

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

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

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

Définition du problème

Etape 1. Estimer la probabilité d'inondation Pf: {Y>seuil}	
Etape 2. Estimer l'influence respective forçages + SLR	

[3] e.g. Saltelli et al. 2008; [4] e.g. looss & Prieur 2019; [5] Idrissi et al. 2021

Définition du problème

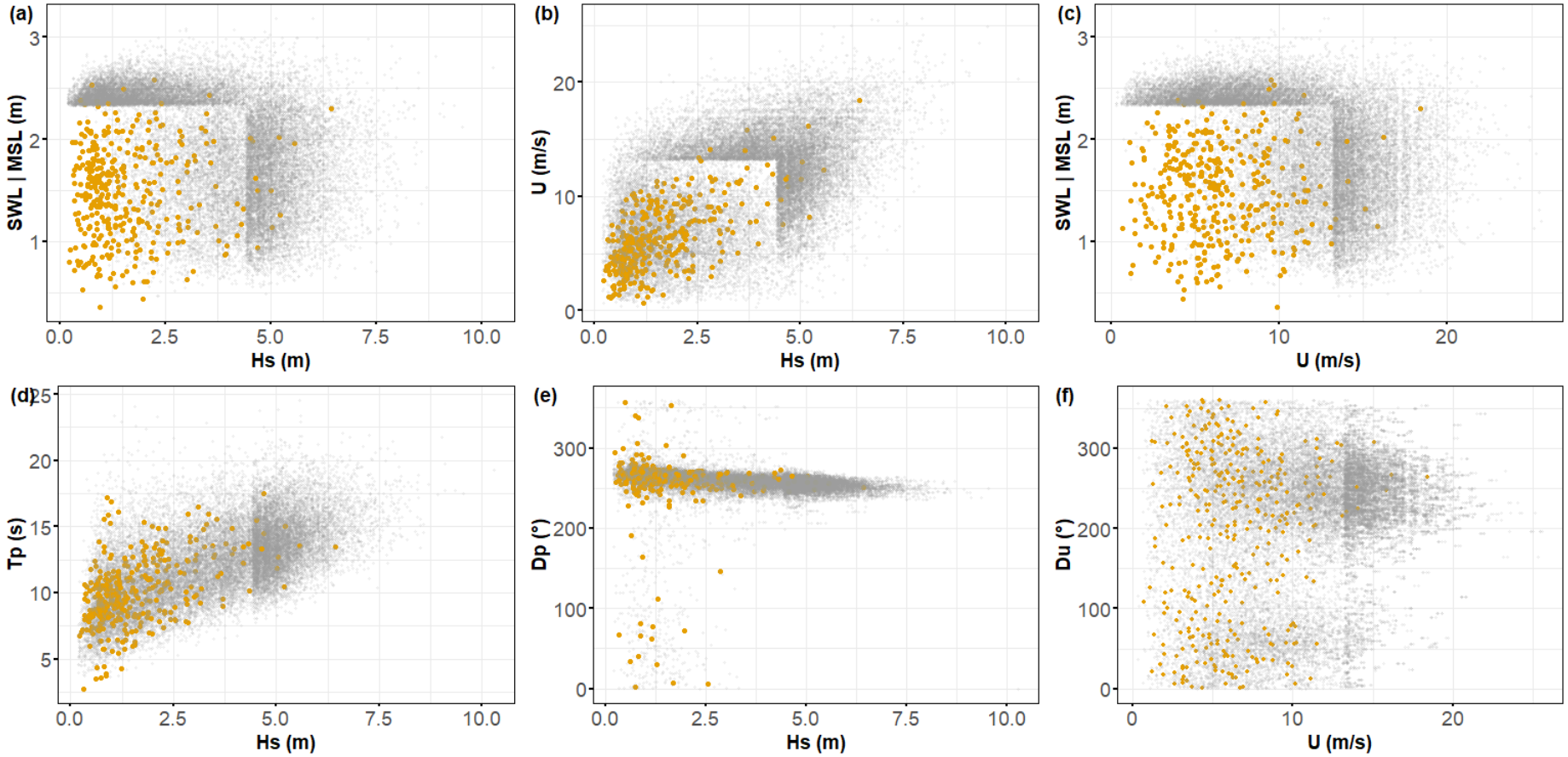
Etape 1. Estimer la probabilité d'inondation Pf: {Y>seuil}	
Méthode: tirage aléatoire Monte-Carlo (>10 000)	
Difficulté 1: générer des **forçages extrêmes** en tenant compte de la **dépendance**	Stat. val. Extrêmes multivariées **[1]**

[1] présentation Betancourt & Rohmer, 15h40, 01/02/22

Forçages aléatoires extrêmes

Observations

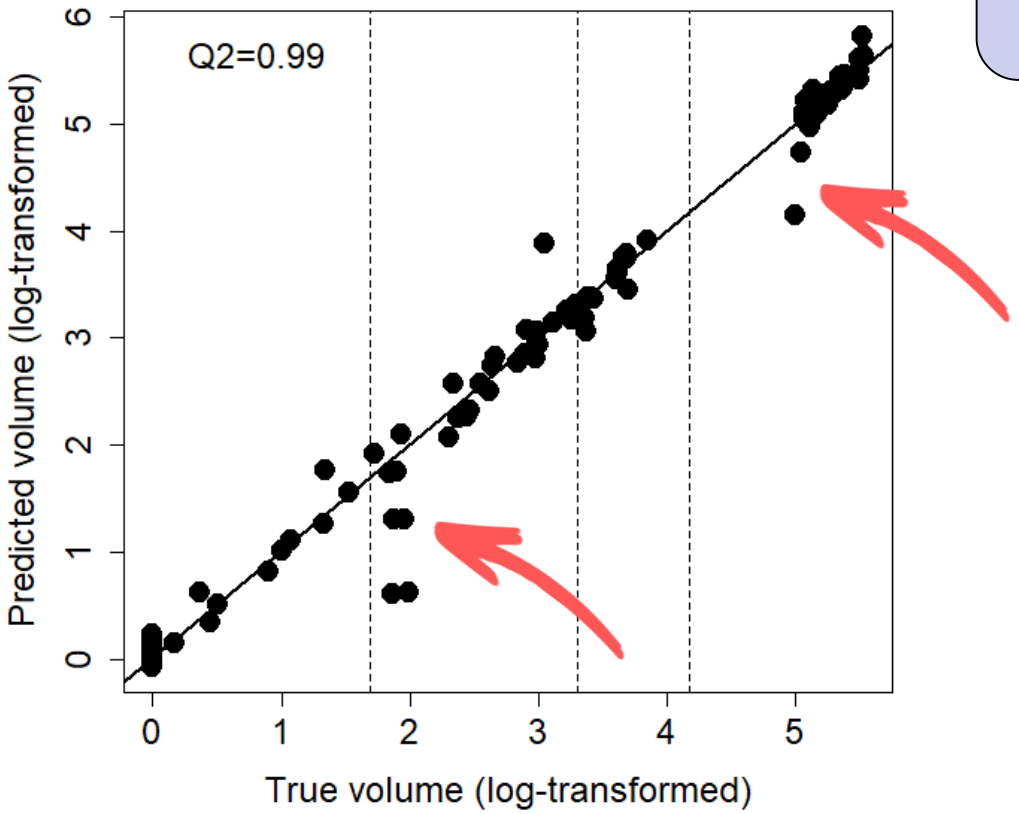
50,000 extremes generated with accounts of dependence



Etape 1. Estimer la probabilité d'inondation Pf: {Y>seuil}	
Méthode: tirage aléatoire Monte-Carlo (>10 000)	
Difficulté 1: générer des **forçages extrêmes** en tenant compte de la **dépendance**	Stat. val. Extrêmes multivariées **[1]**
Difficulté 2: 1 tirage = 1 simulation numérique couteuse → **Valider l'approximation** → **Intégrer l'erreur d'approximation**	Métamodèle **[2]**

[2] présentation Betancourt, Lopez & Rohmer, 10h45, 02/02/22

Ingrédient 1: validation croisée

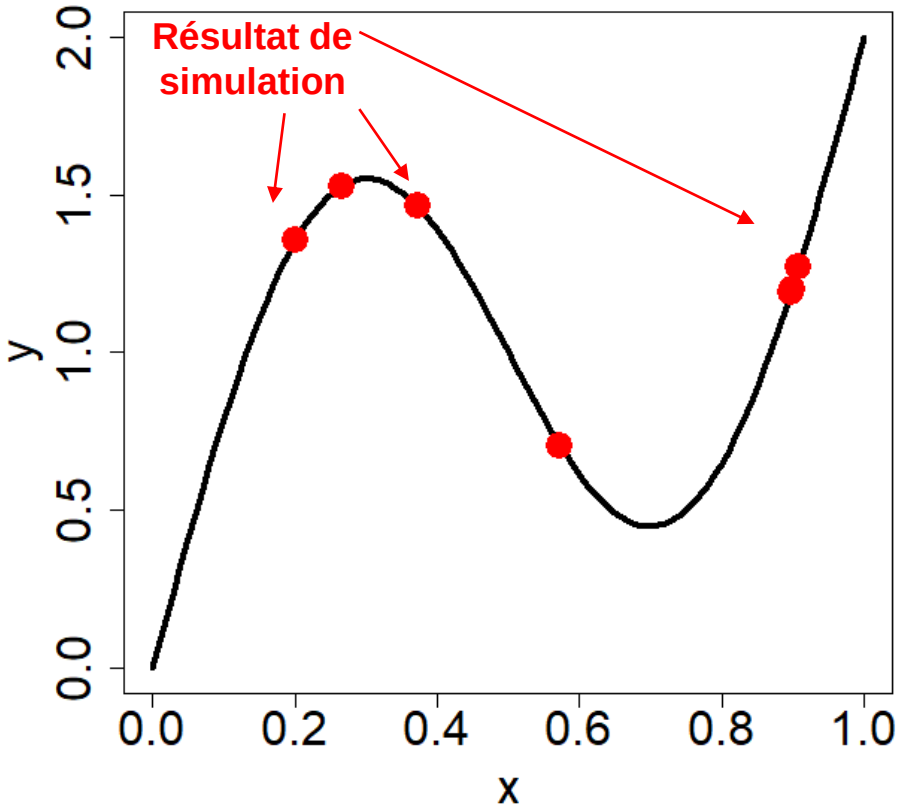


Validation d'un métamodèle « Gp » avec entrées **scalaires**

Ingrédient 2: trajectoires aléatoires du Gp

Cas jouet illustratif

Vraie fonction inconnue ——



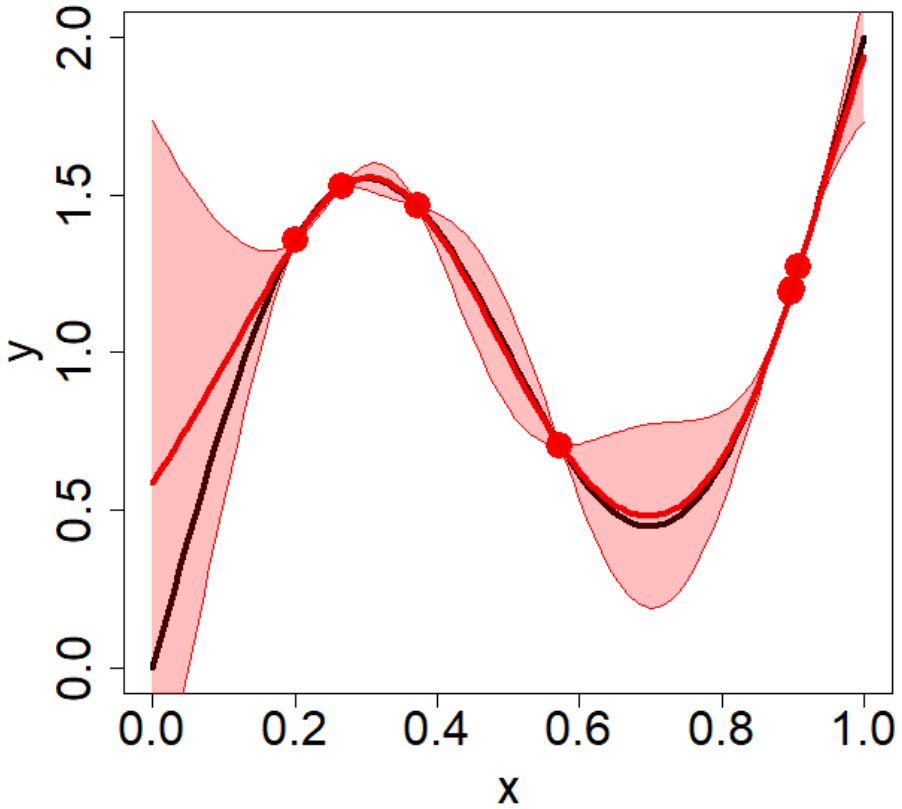
Ingrédient 2: trajectoires aléatoires du Gp

Cas jouet illustratif

Vraie fonction inconnue ——

Prédiction (moyenne Gp) ——

Erreur de prédiction (95%)



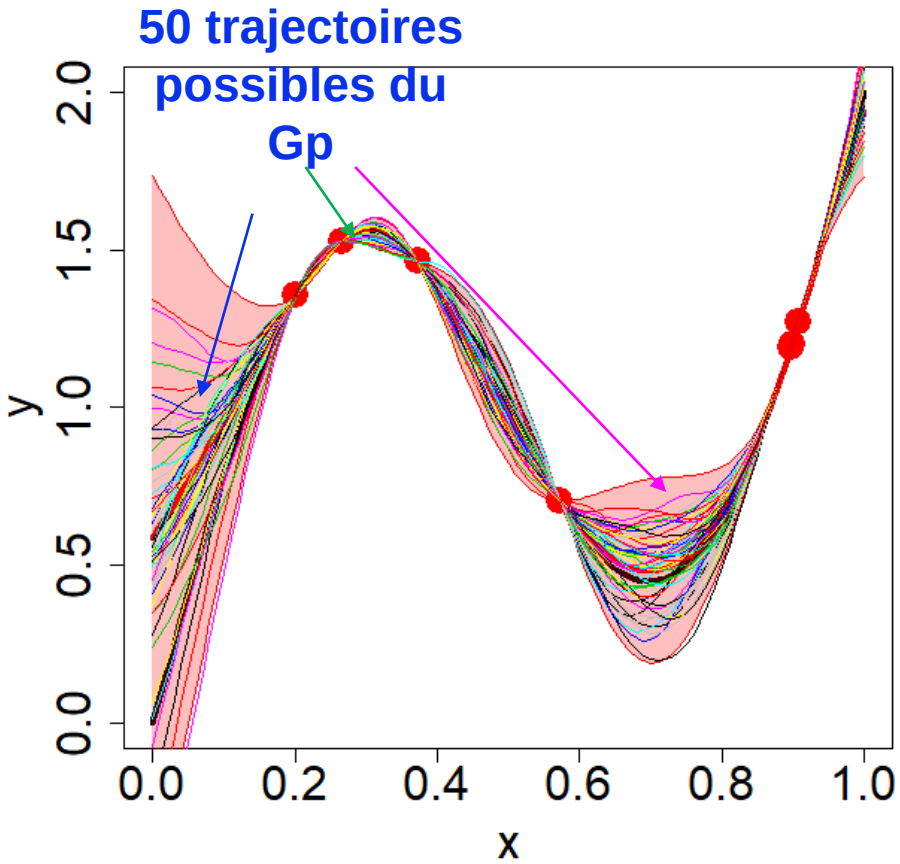
Ingrédient 2: trajectoires aléatoires du Gp

Cas jouet illustratif

Vraie fonction inconnue ——

Prédiction (moyenne Gp) ——

Erreur de prédiction (95%)



Démarche d'intégration des **erreurs d'estimation**

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

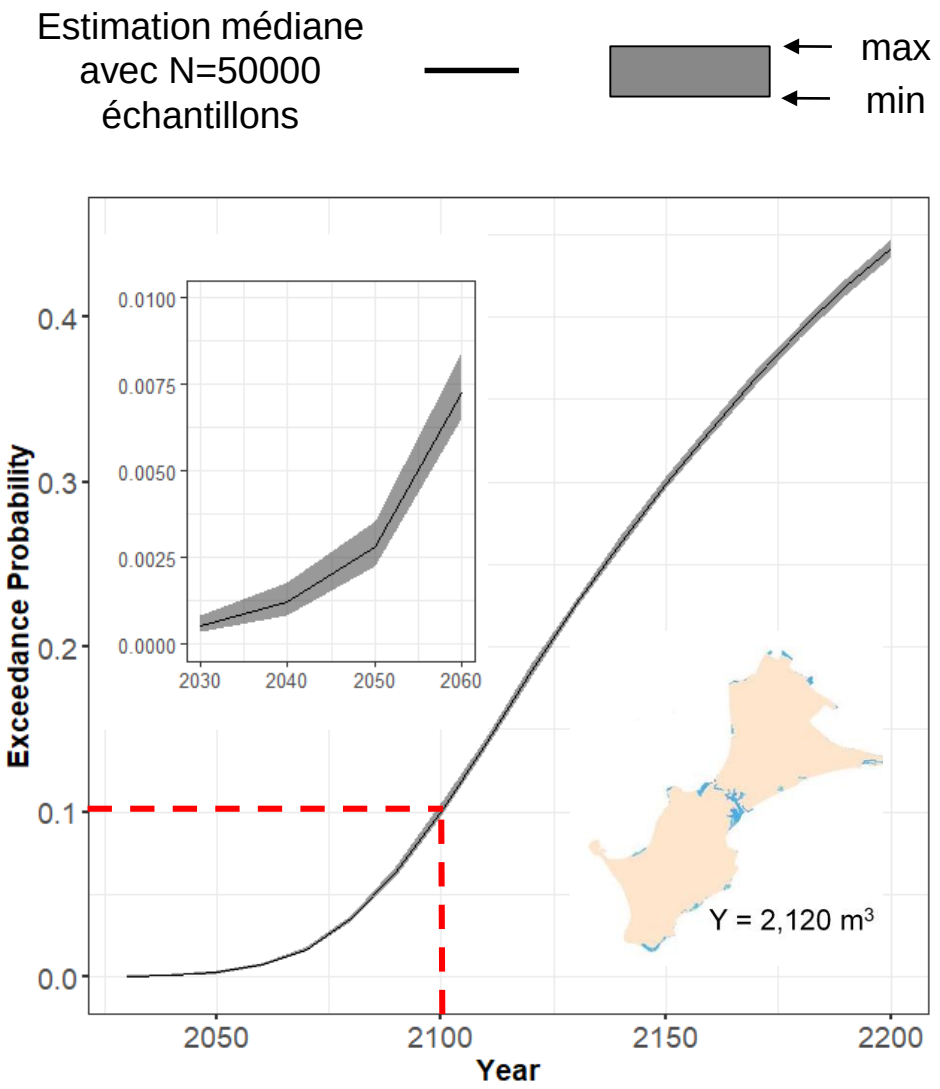
Etape (2) Génération d'une trajectoire $\widetilde{\mathrm{Gp}}$

Etape (3) Calcul de la probabilité Pf avec $\widetilde{\mathrm{Gp}}\ (\mathbf{X}_i)$

Refaire Etapes 1-3 (n fois)

Résultat: n valeurs Pf (synthétisées par min/max Pf)

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



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

Définition du problème

Etape 1. Estimer la probabilité d'inondation	
Etape 2. Estimer l'influence respective forçages + SLR	
Méthode: analyse globale de sensibilité **[3]**	

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
= mesure la contribution de X_i à Var(Y)

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

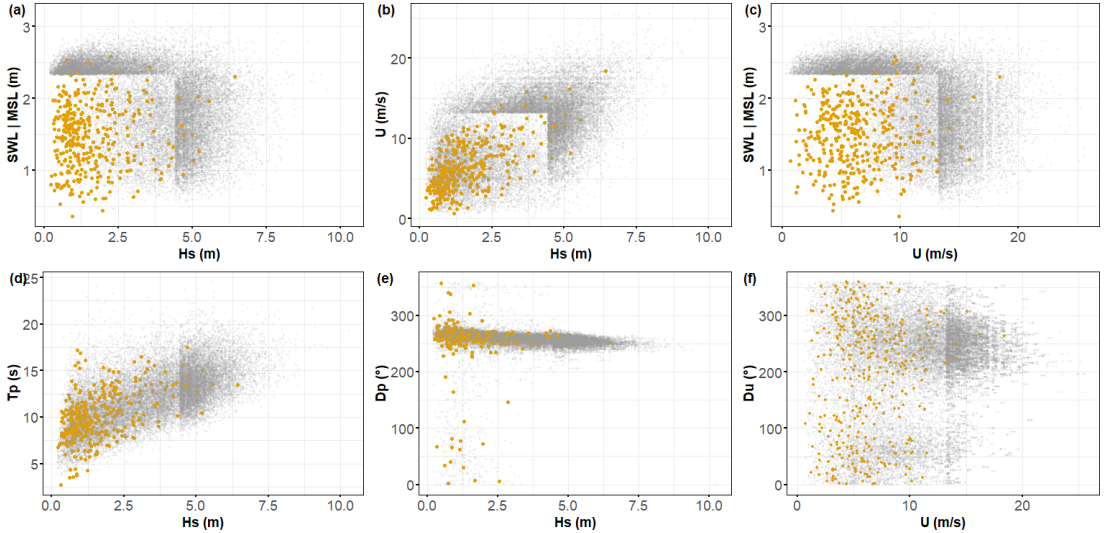
Y volume d'eau entrant à terre

[3] e.g. Saltelli et al. 2008

Etape 1. Estimer la probabilité d'inondation?	
Etape 2. Estimer l'influence respective forçages + SLR	
Méthode: analyse globale de sensibilité **[3]**	
Difficulté 1: approches Monte-Carlo	Métamodèle **[2]**

[3] e.g. Saltelli et al. 2008; [4] e.g. looss & Prieur 2019; [5] Idrissi et al. 2021

Etape 1. Estimer la probabilité d'inondation?	
Etape 2. Estimer l'influence respective forçages + SLR	
Méthode: analyse globale de sensibilité **[3]**	
Difficulté 1: approches Monte-Carlo	Métamodèle **[2]**
Difficulté 2: tenir compte de la dépendance	Shapley eff. **[4]**



Intérêt: ces indices incluent:

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

[3] e.g. Saltelli et al. 2008; [4] e.g. looss & Prieur 2019; [5] Idrissi et al. 2021

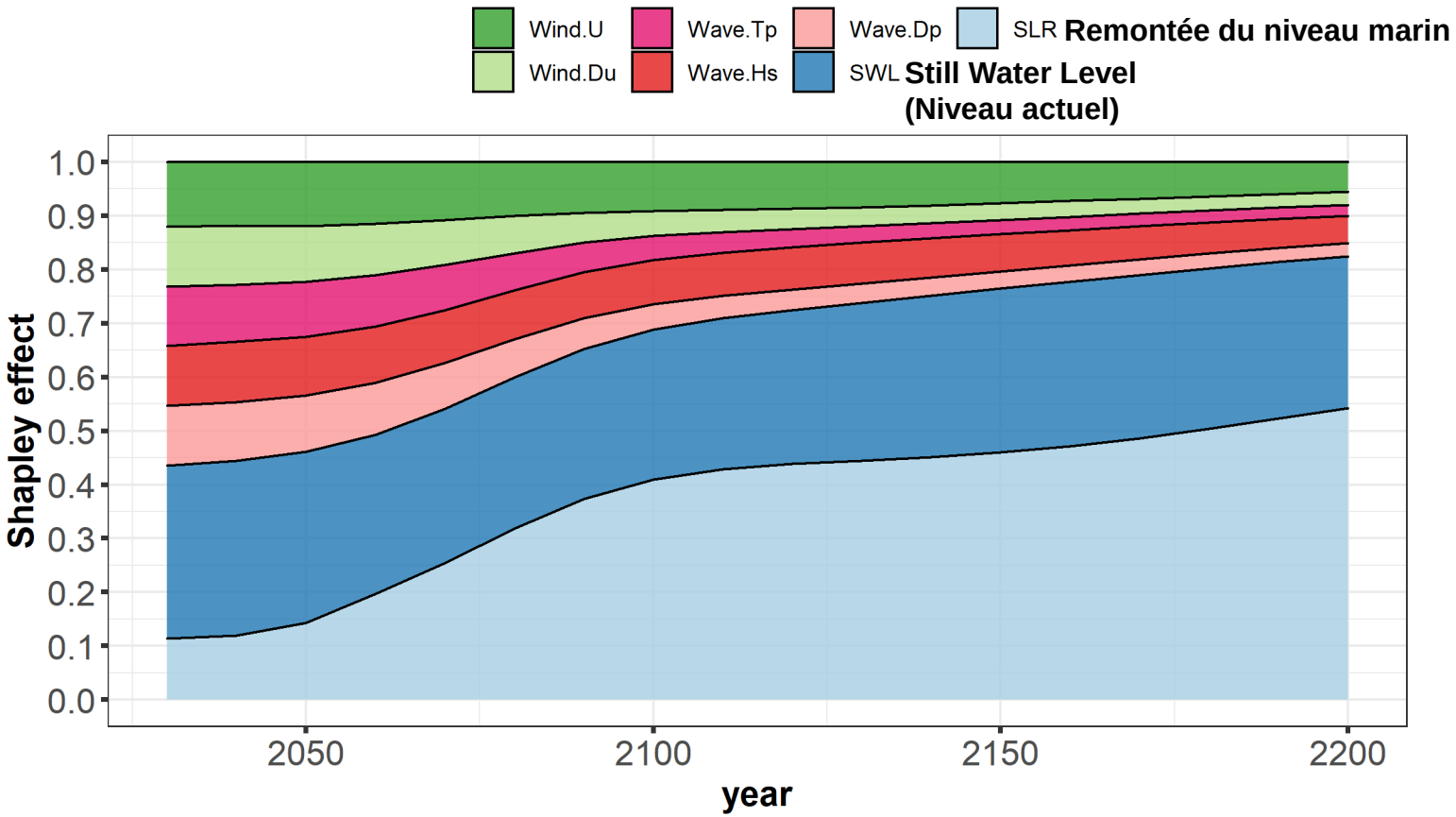
Etape 1. Estimer la probabilité d'inondation?	
Etape 2. Estimer l'influence respective forçages + SLR	
Méthode: analyse globale de sensibilité **[3]**	
Difficulté 1: approches Monte-Carlo	Métamodèle **[2]**
Difficulté 2: tenir compte de la dépendance	Shapley eff. **[4]**
Difficulté 3: adapté au problème de **dépassement de seuil**	Target Shap. **[5]**

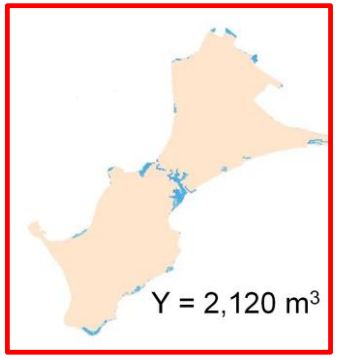
Intérêt:

- **Mesure l'influence des variables sur l'occurrence de l'évènement de risque {Y>Yc}**
- **En tenant compte des dépendances entre variables**

[3] e.g. Saltelli et al. 2008; [4] e.g. Iooss & Prieur 2019; [5] Idrissi et al. 2021

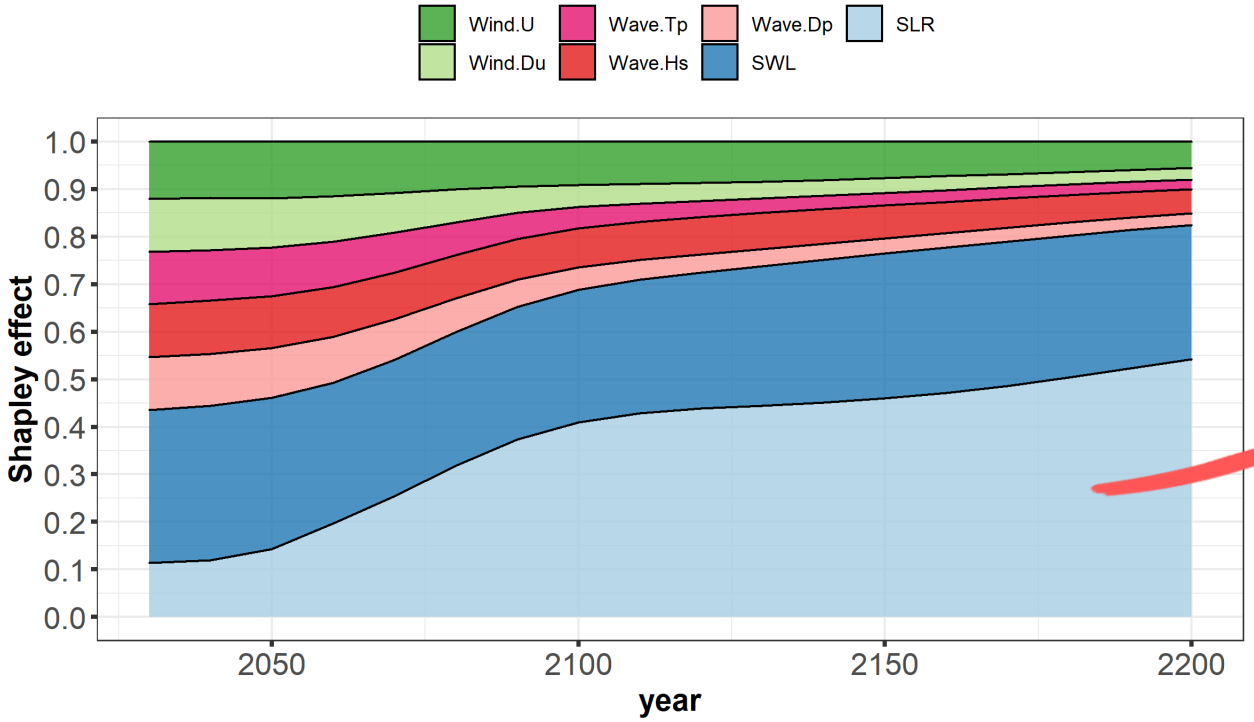
Influence sur **{Y>Yc},** Yc=**2000m3**, **RCP4.5**

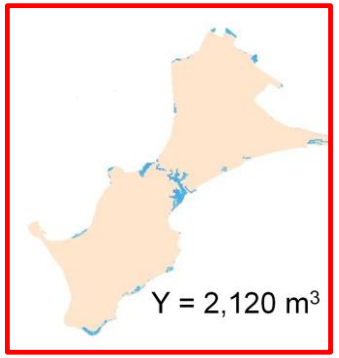




50 000 échantillons aléatoires avec l'estimateur de Broto et al. (2020)'s (5 voisins + a pre-whitening)

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

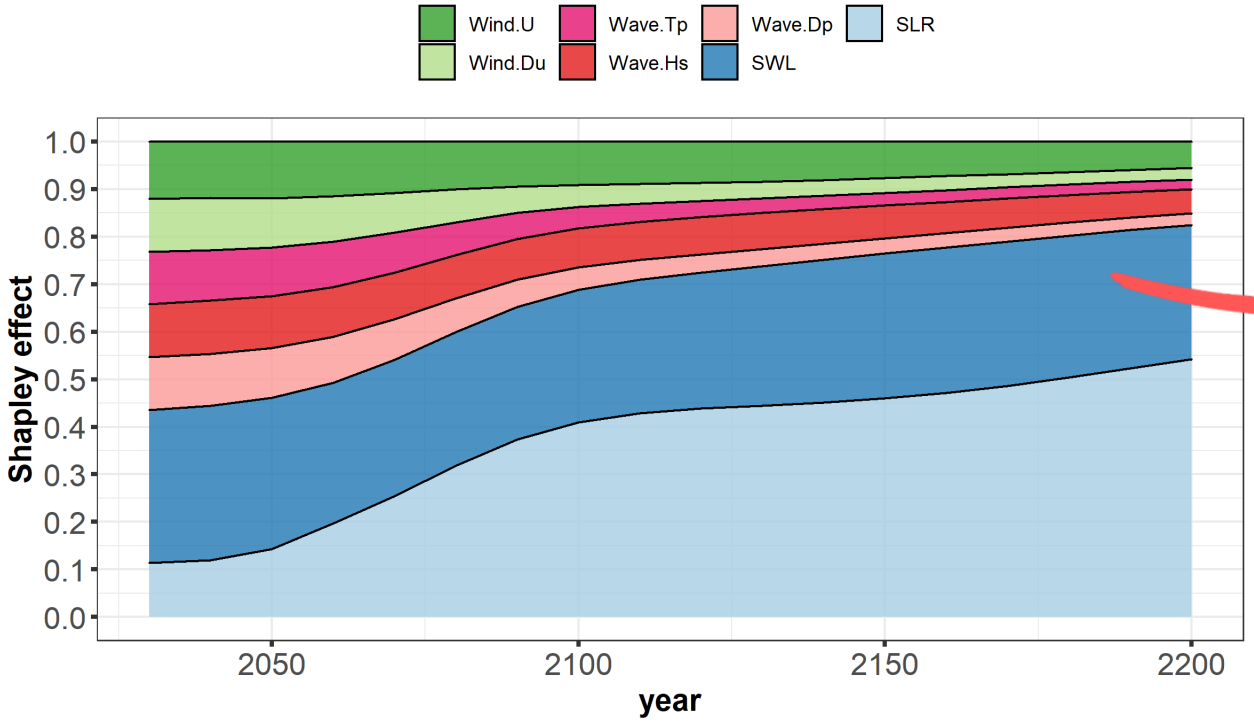


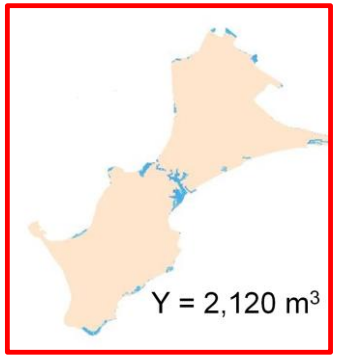


Influence de SLR

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

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

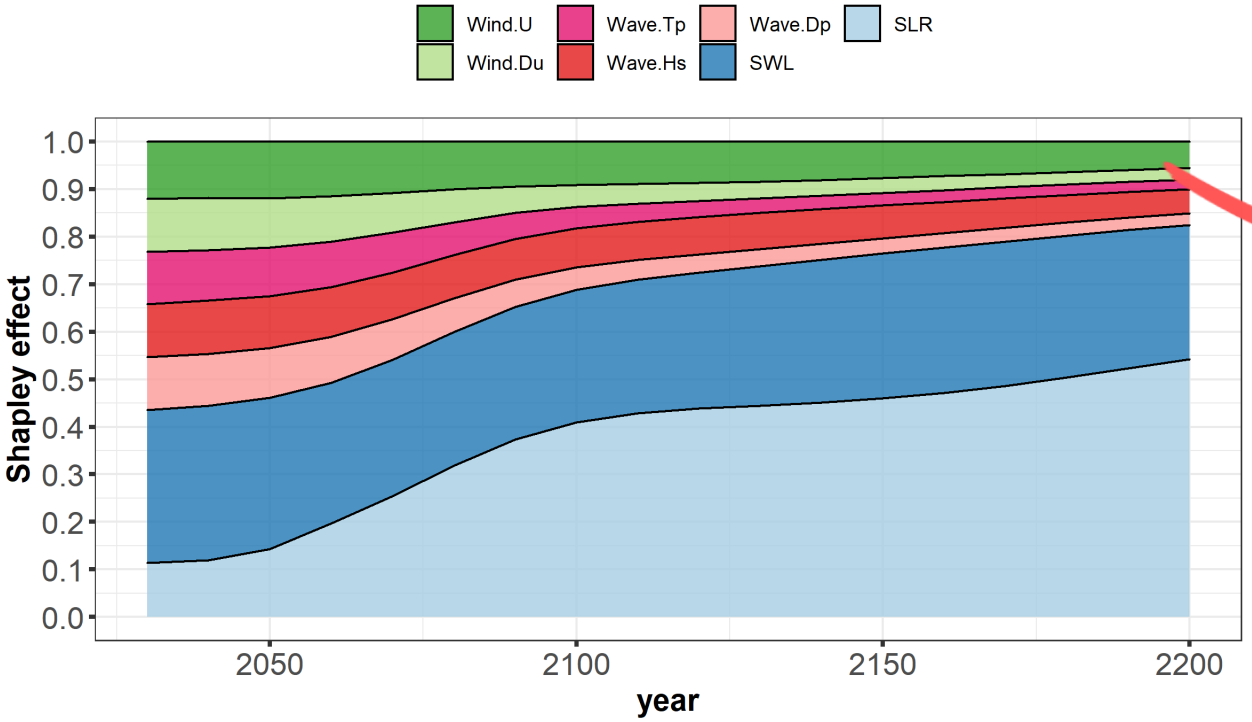


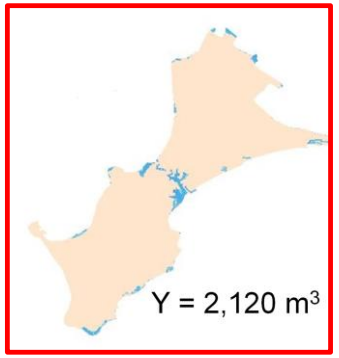


Influence de SWL

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

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



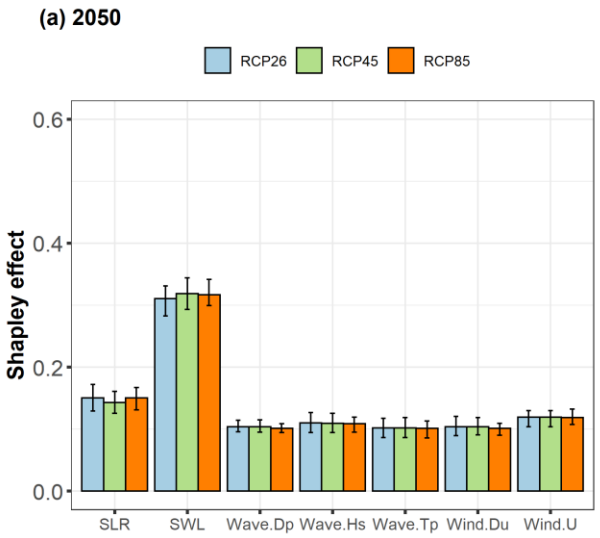


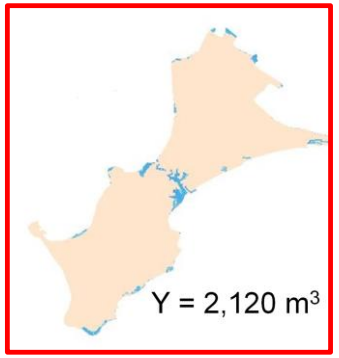
Influence de vagues/vents

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

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

Confidence interval using 50 replicates

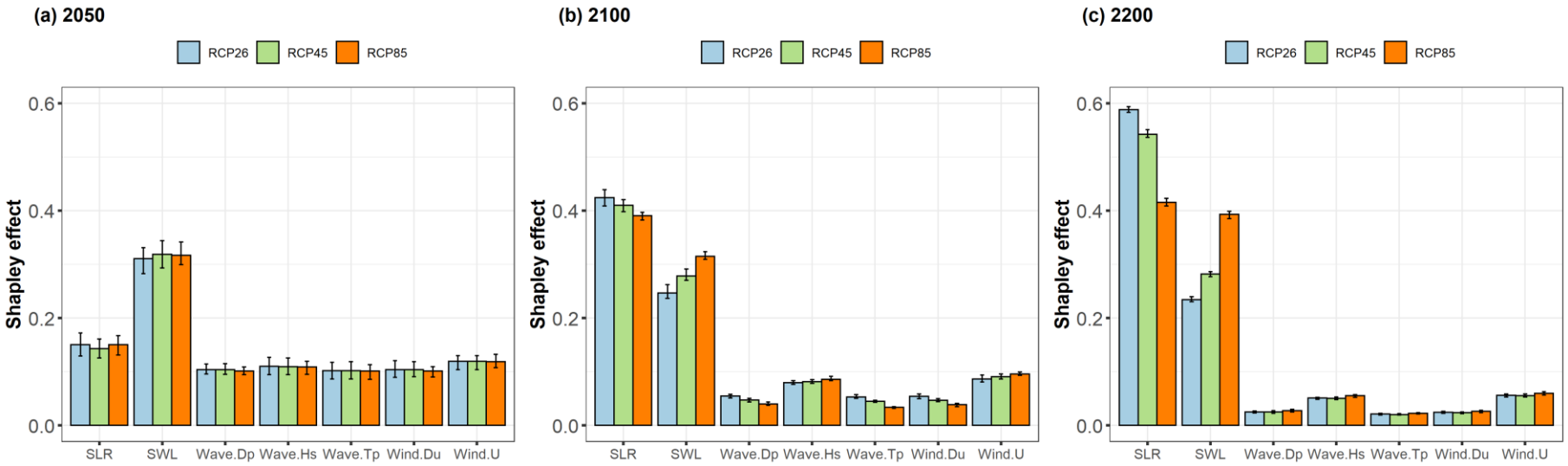




[Rohmer et al., 2021]

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

Confidence interval using 50 replicates



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

[Rohmer et al., 2021]

Résumé

- Projections futures probabilistes de la submersion et analyse de sensibilité **FAISABLES** grâce à la mise en place du **métamodèle RISCOPE**

- **L'influence de l'incertitude** du métamodèle a peu d'impact

- **Influence claire de SLR** (dès le court/moyen terme)

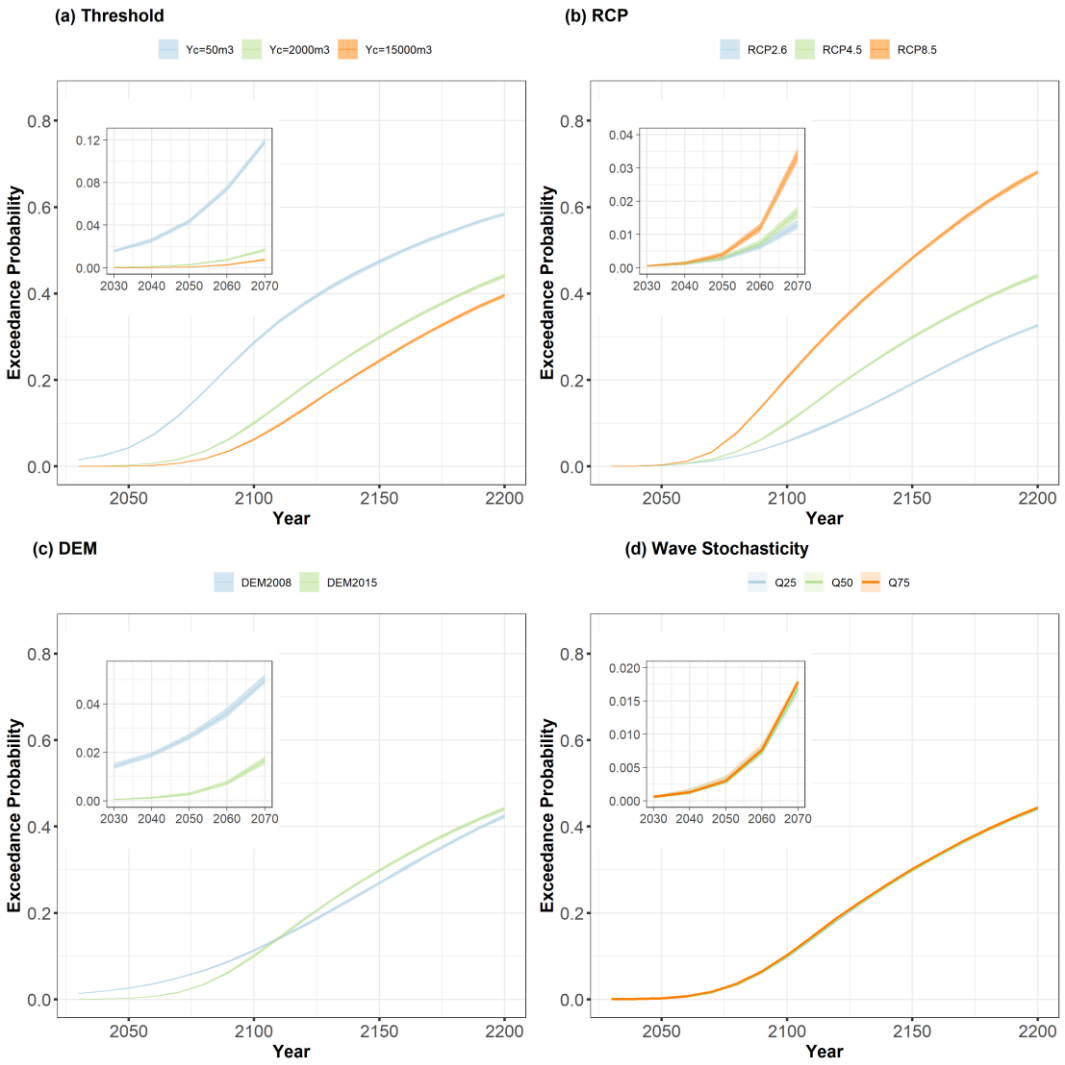
- Importance **décroissante** des facteurs vagues/vents (voire négligeable après 2100)

- **A explorer:** impact des hypothèses de modélisation (seuil, bathymétrie, etc.)

Annexes

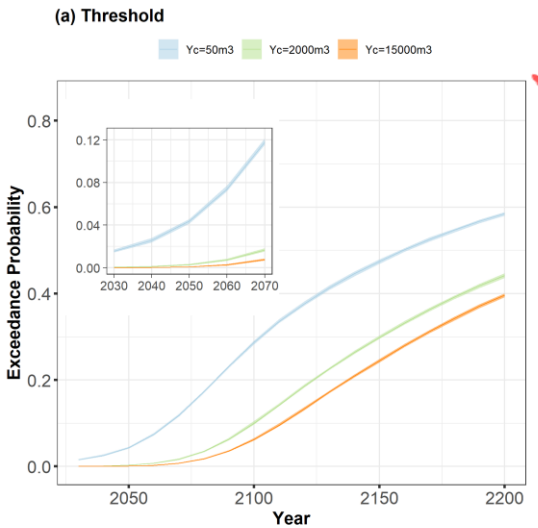
La suite… impact des choix de modélisation

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

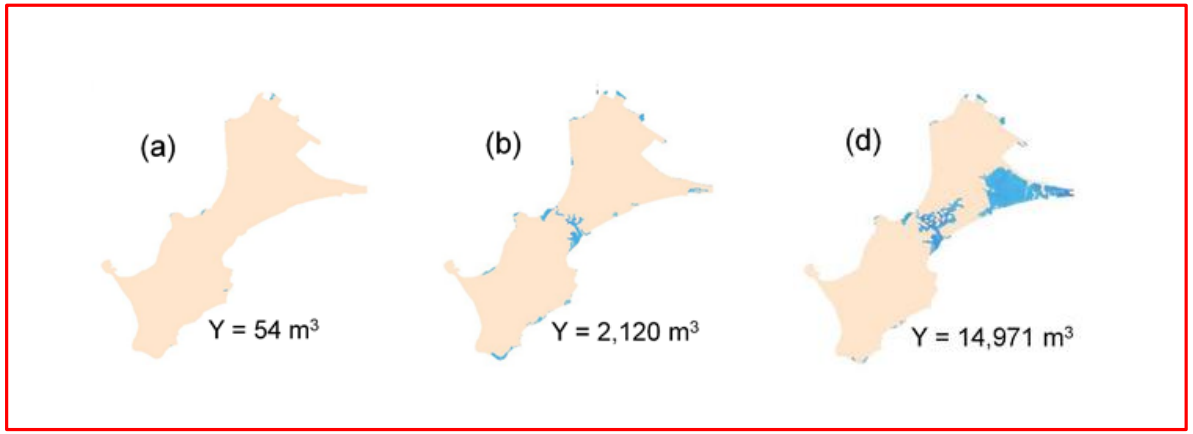


Impact des choix de modélisation

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



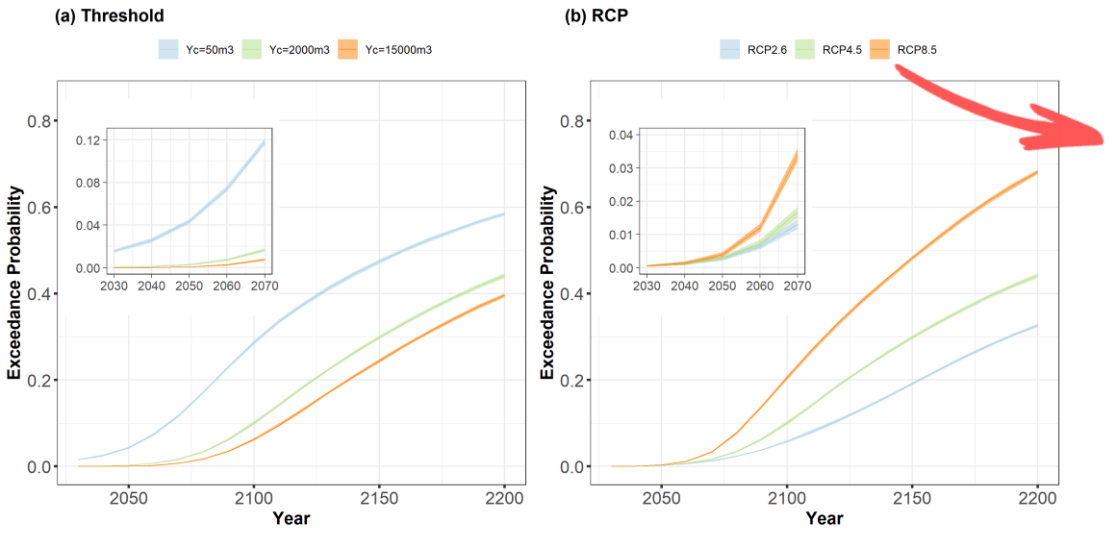
Effet du choix du seuil Yc



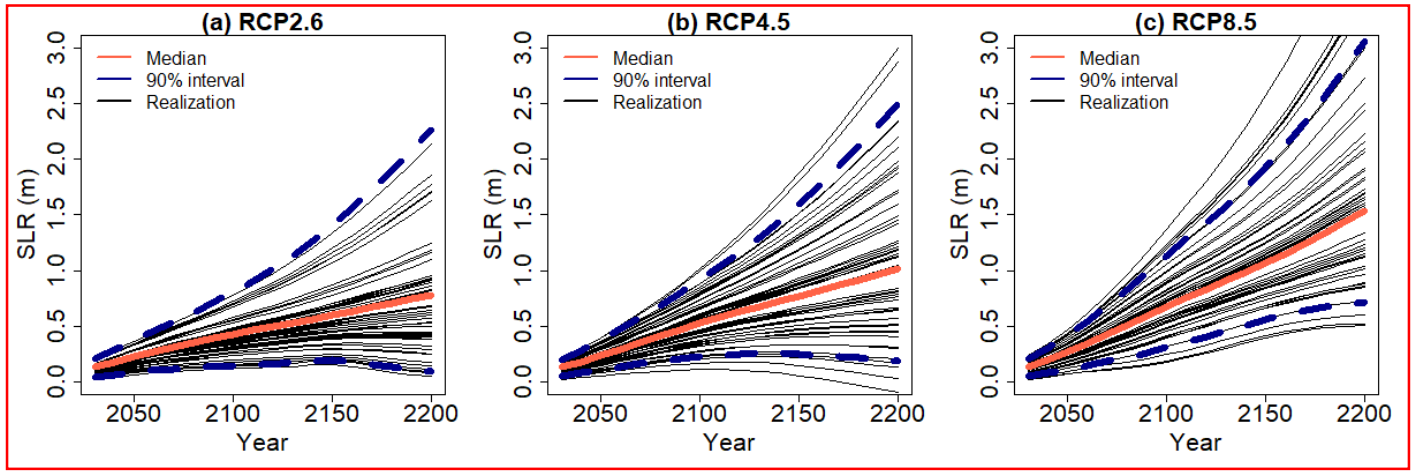
Pf(2100)~30% | **Pf(2100)~10%** | **Pf(2100)~6%**

Impact des choix de modélisation

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



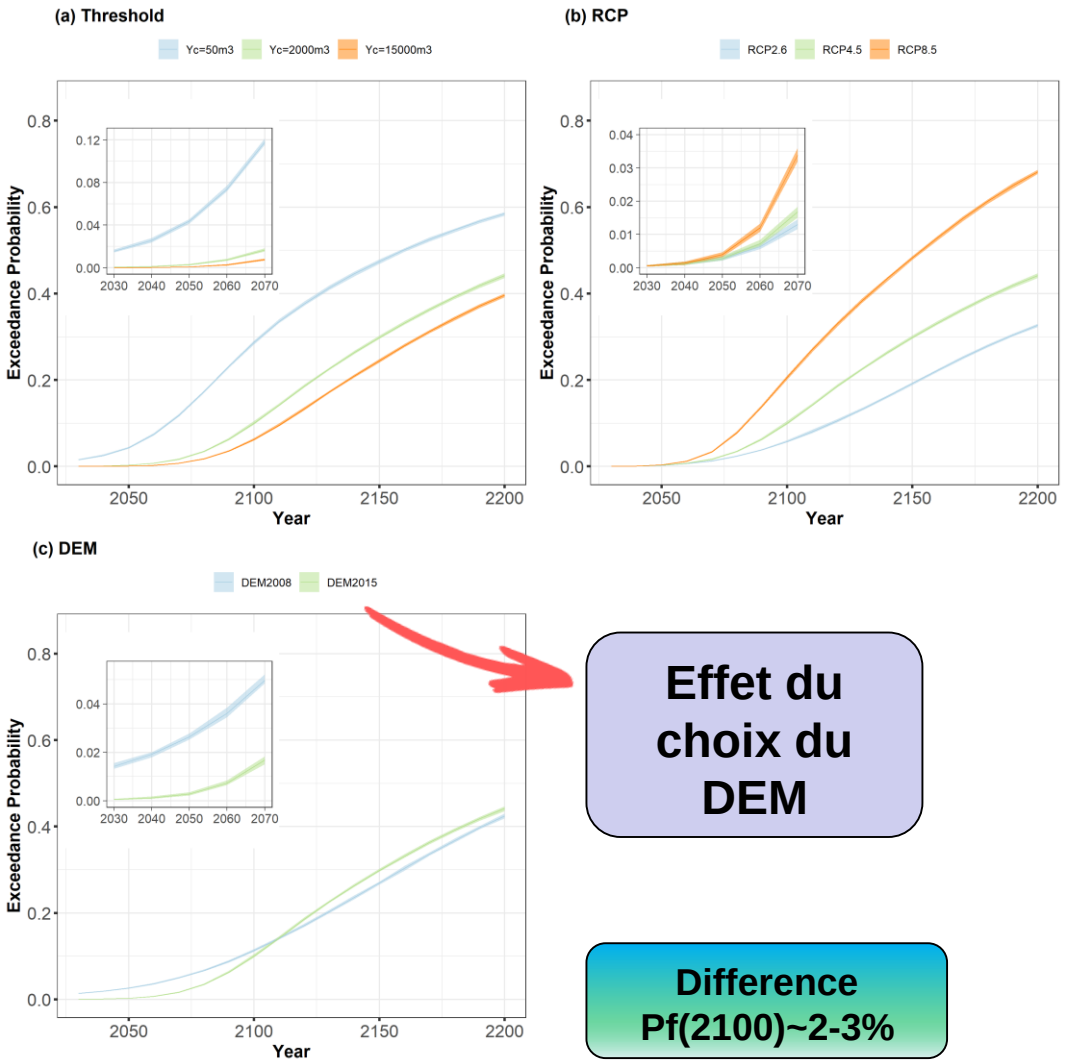
Effet du choix du scénario RCP



Pf(2100)~5% **Pf(2100)~10%** **Pf(2100)~20%**

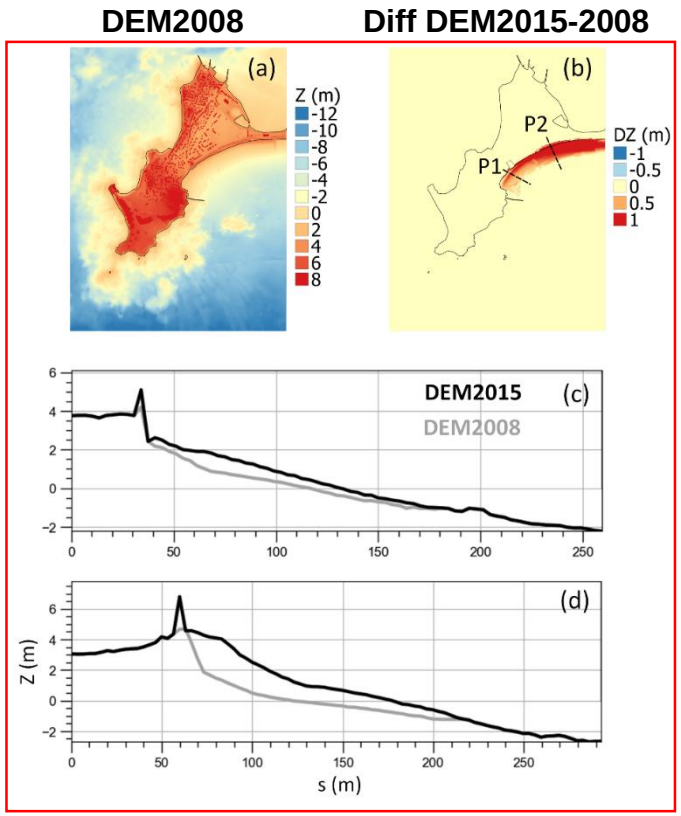
Impact des choix de modélisation

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



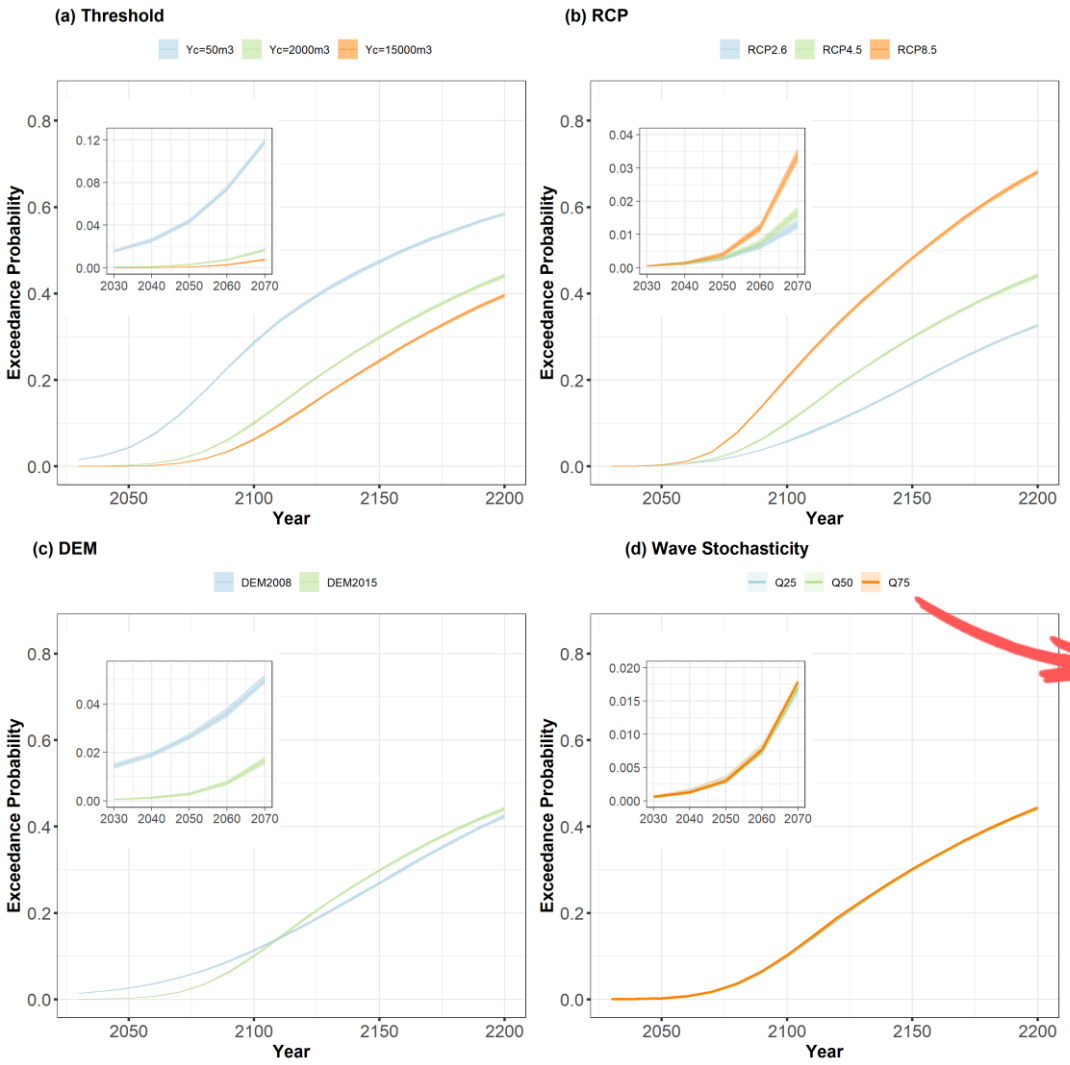
Effet du choix du DEM

Difference Pf(2100)~2-3%



Impact des choix de modélisation

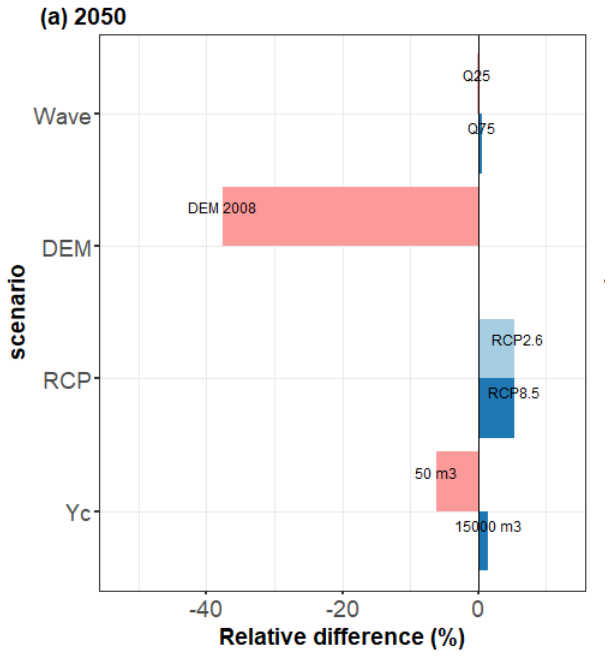
Cas de référence: Seuil Yc=2000, scénario RCP4.5, Bathymétrie DEM2015, wave stochas.: Q50



Effet de la stochasticité des vagues

« Sensibilité de l'analyse de sensibilité »

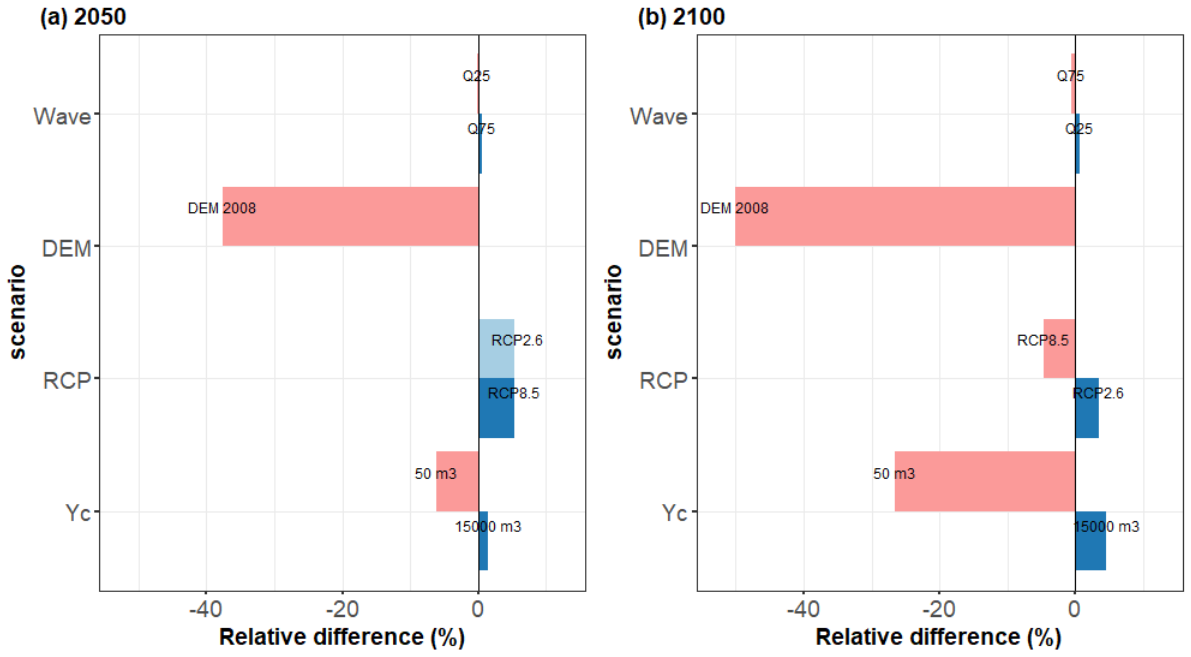
Différence relative de l'influence de SLR par rapport au **cas de référence**



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

« Sensibilité de l'analyse de sensibilité »

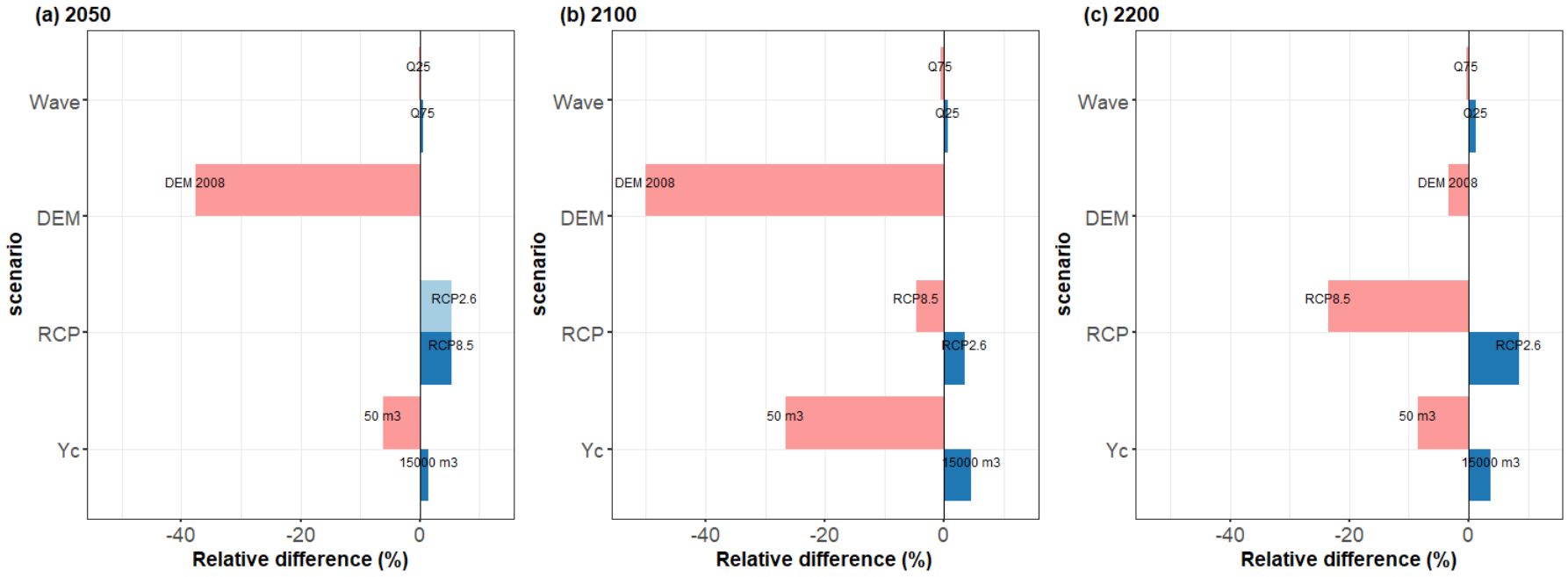
Différence relative de l'influence de SLR par rapport au **cas de référence**



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

« Sensibilité de l'analyse de sensibilité »

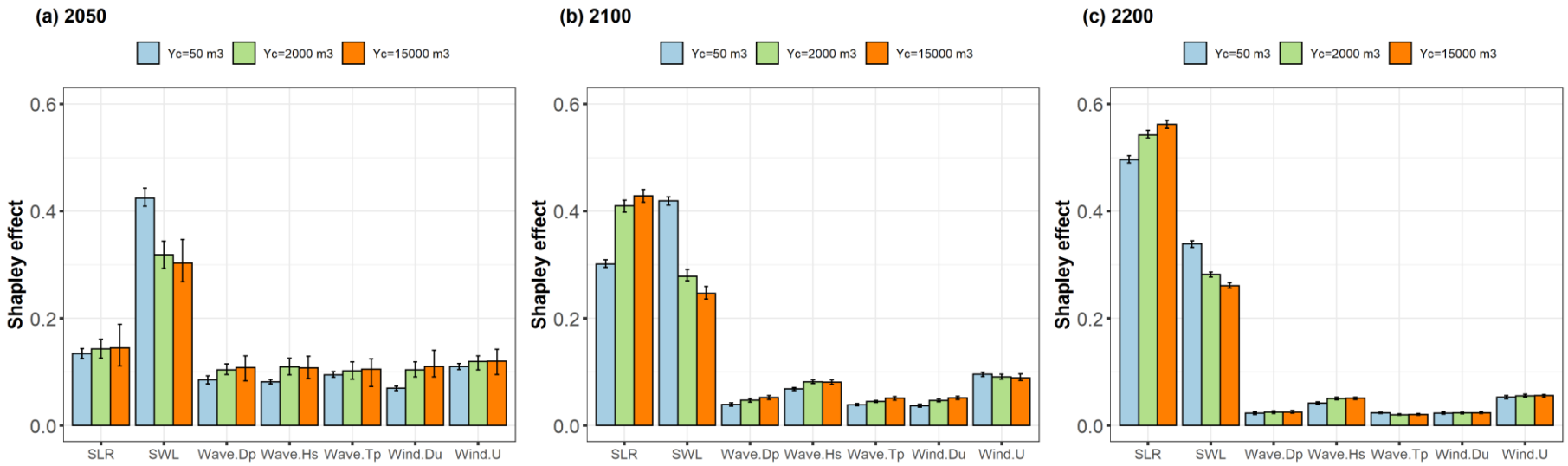
Différence relative de l'influence de SLR par rapport au **cas de référence**



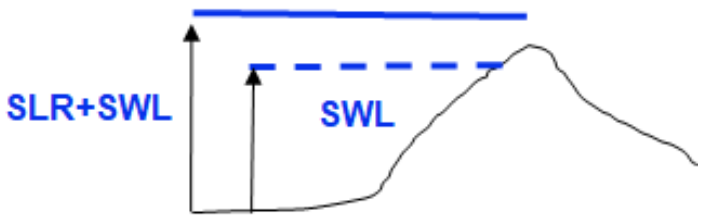
Cas de référence: Seuil Yc=2000, scénario RCP4.5, Bathymétrie DEM2015, wave stochas.: Q50

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

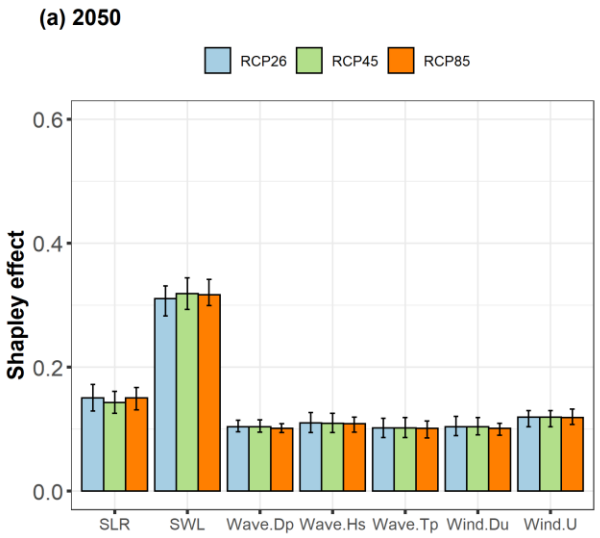


Cas de référence: Seuil Yc=2000, scénario RCP4.5, Bathymétrie DEM2015, wave stochas.: Q50

[1] Rohmer et al., 2021

Effet du scénario RCP [1]

Confidence interval
using 50 replicates

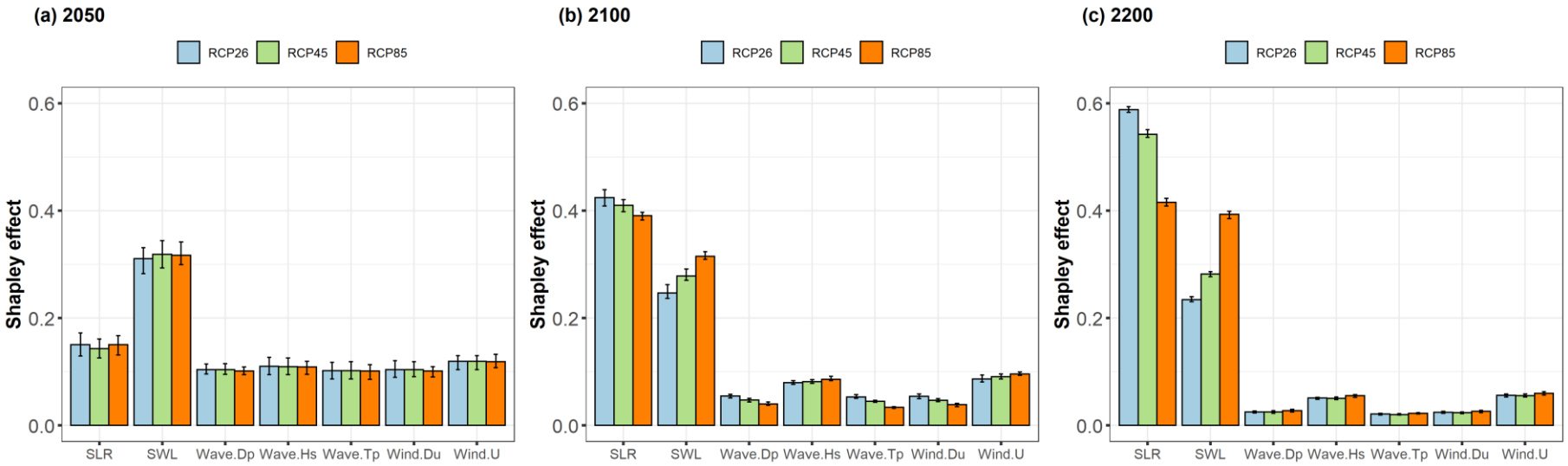


Cas de référence: Seuil Yc=2000, **scénario RCP4.5**, Bathymétrie DEM2015, wave stochas.: Q50

[1] Rohmer et al., 2021

Effet du scénario RCP [1]

Confidence interval using 50 replicates

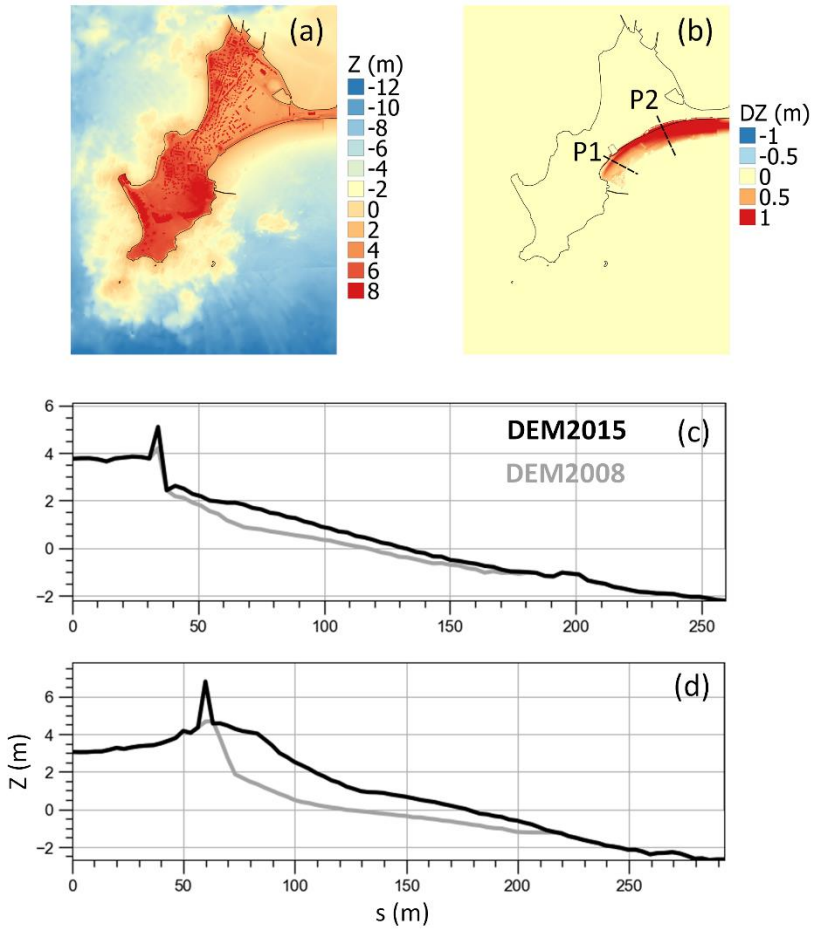


de RCP2.6 à RCP8.5, l'influence de SLR est réduite et compensée par le niveau total SWL (sans SLR)

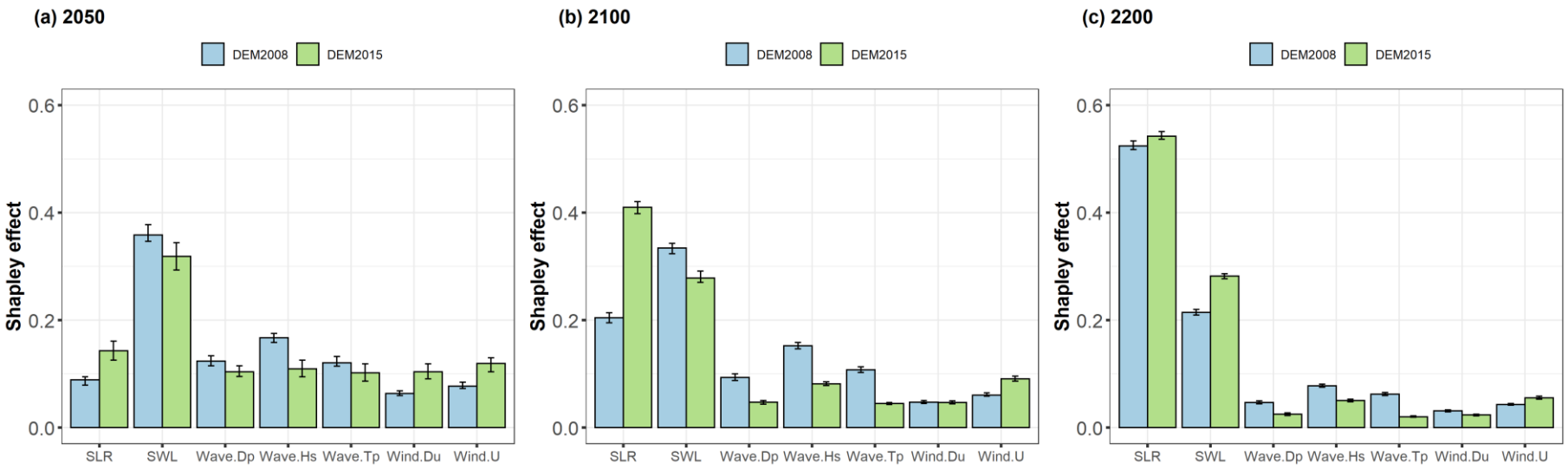
Cas de référence: Seuil Yc=2000, **scénario RCP4.5**, Bathymétrie DEM2015, wave stochas.: Q50

[1] Rohmer et al., 2021

Effet de la bathymétrie 2015 - 2008

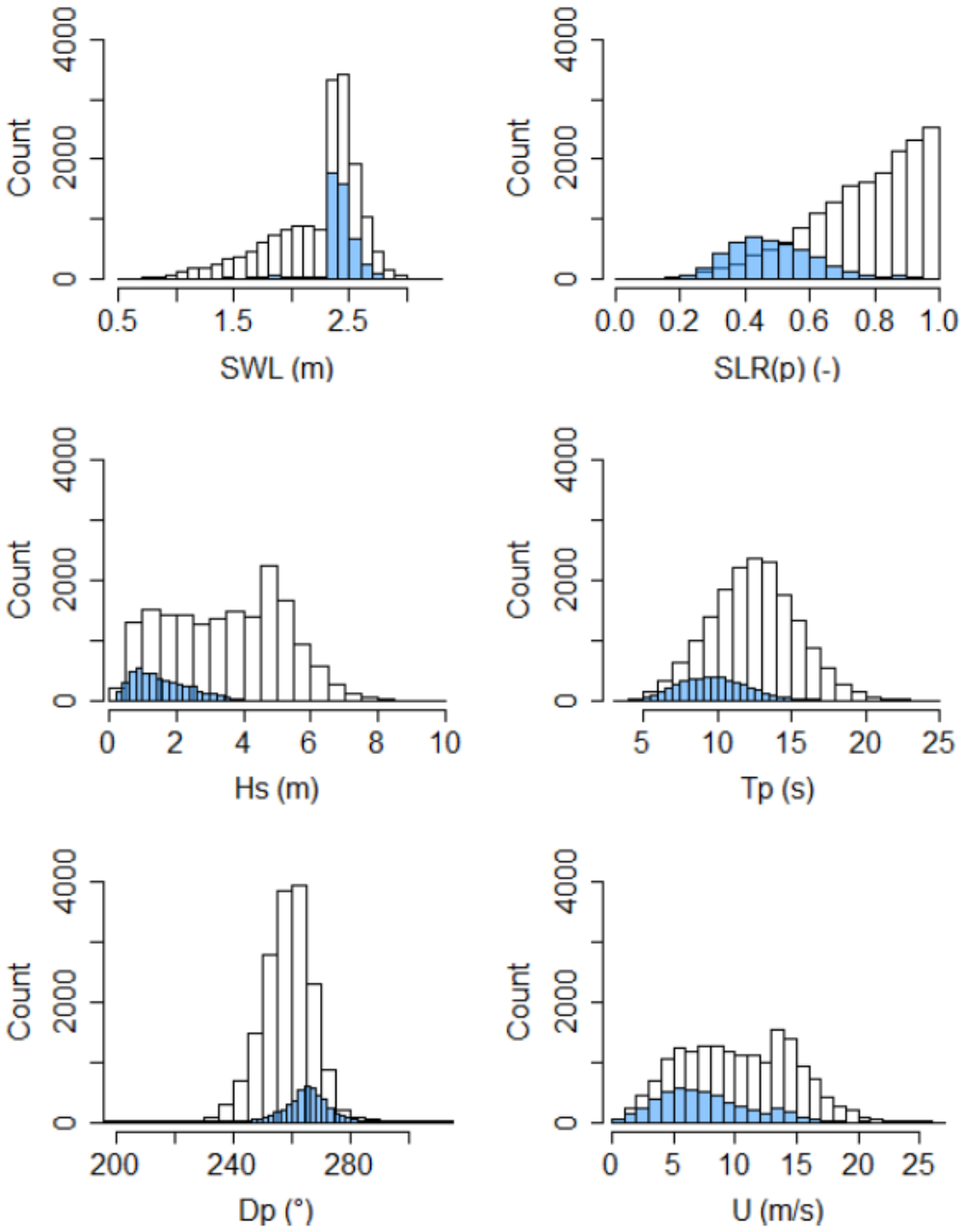


Effet bathymétrie [1]



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

[1] Rohmer et al., 2021



DEM2015

DEM2008

Sensitvity analysis with or without accounts for dependence

$$X \sim \mathcal{N}\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{pmatrix}\right)$$
$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$$

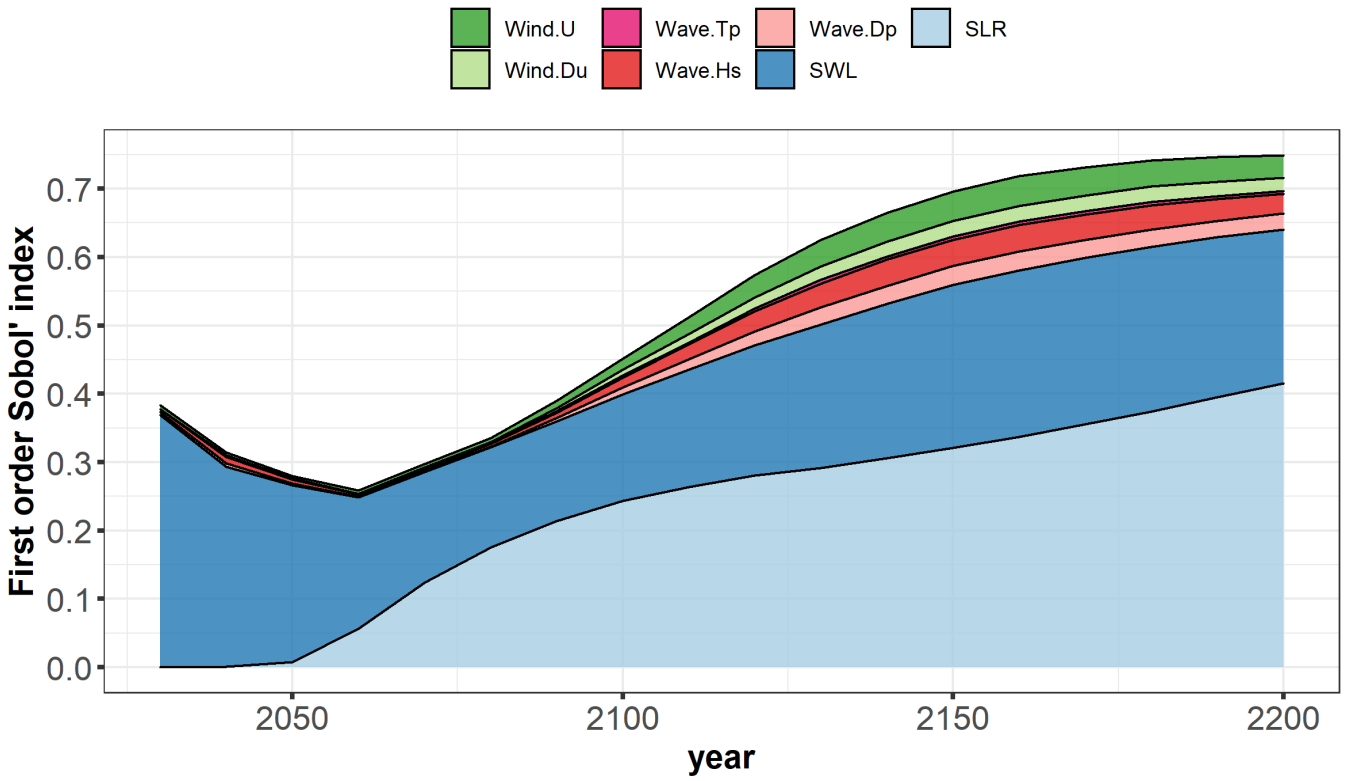
Theoretical sensitivity measure (decomposition of variance)

$$\eta_1 = \frac{\beta_1^2 + \rho\beta_1\beta_2 - \rho^2(\beta_1^2 - \beta_2^2)/2}{\beta_1^2 + \beta_2^2 + 2\rho\beta_1\beta_2}, \quad \eta_2 = 1 - \eta_1$$

Application to: $Y = X1 + X2$ **with ρ= 0.25**

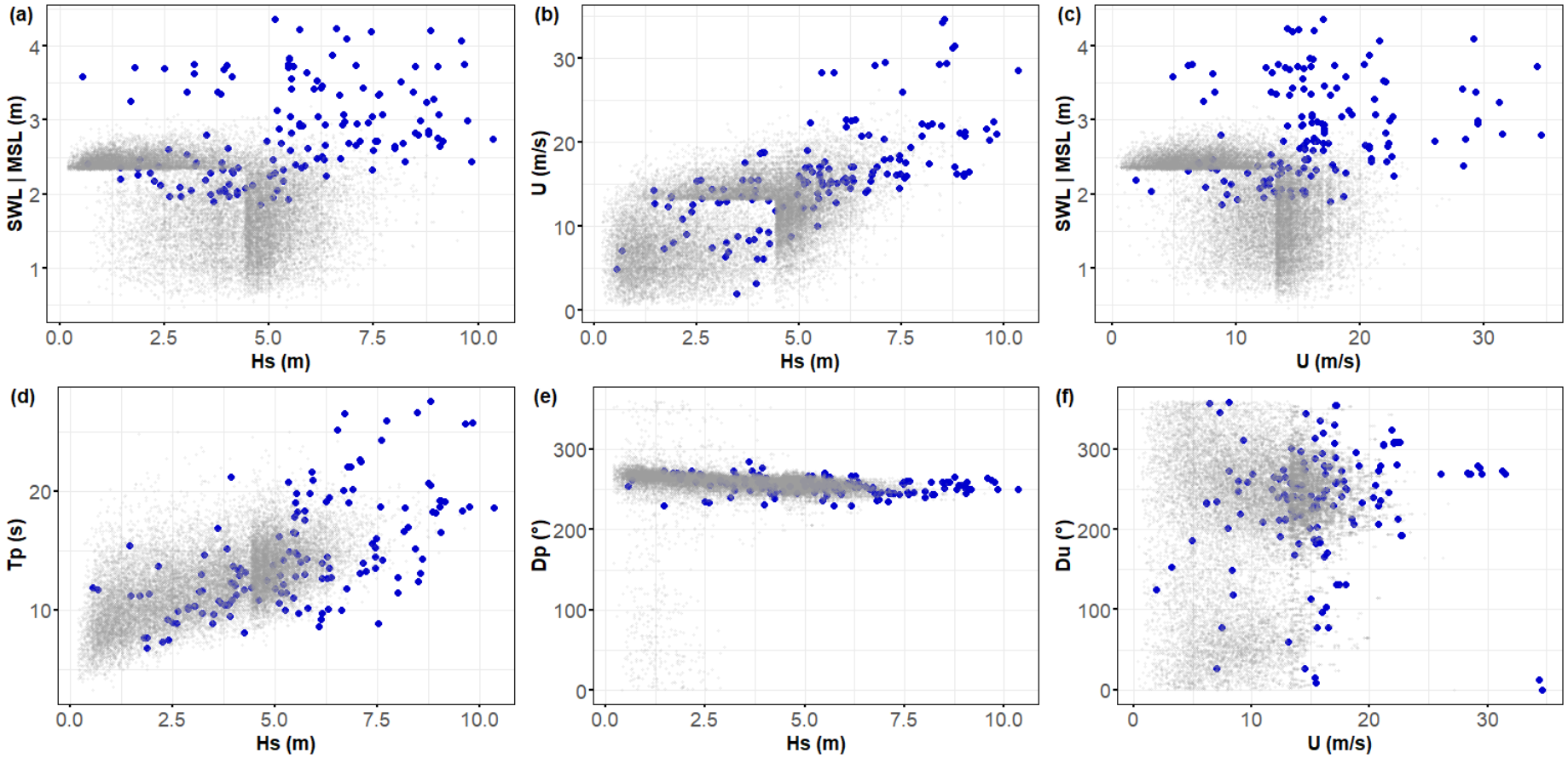
	η1	η2
theory	0.500	0.500
Standard meth.	0.320	0.330
With dep.	0.502	0.498

Analyse « sans effet de dépendance »



Training points

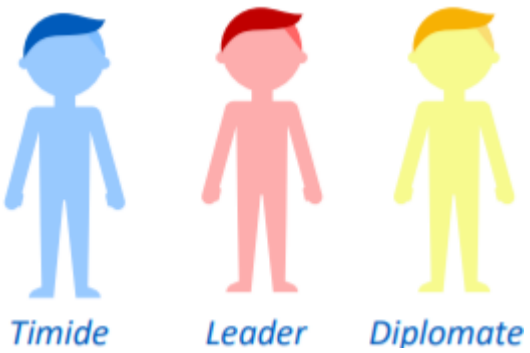
Extremes generated with accounts of dependence

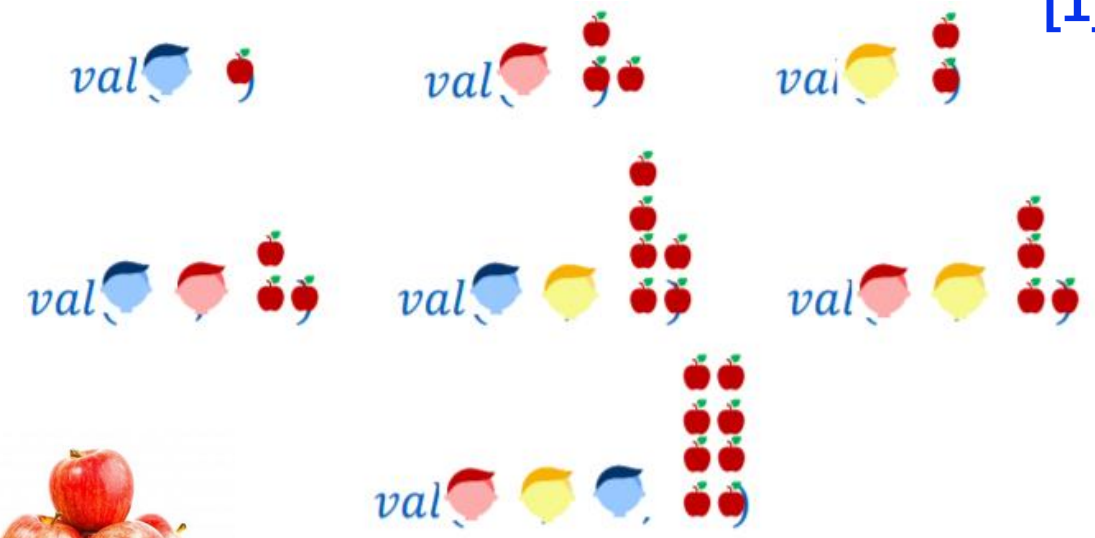


4 Axiomes :

- 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

[1]

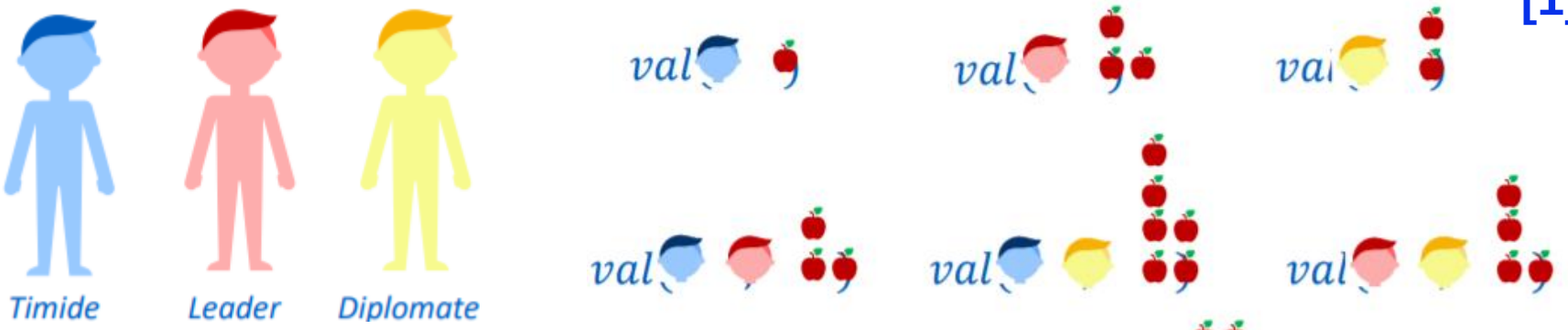




Comment redistribuer la production ϕ de manière coopérative parmi k travailleurs ?

[1] Adapté de Iooss (2021)

[1]



Comment redistribuer la production ϕ de manière coopérative parmi k travailleurs ?

Solution unique dans la théorie des jeux respectant 4 axiomes: valeur de Shapley [2]

$$\phi_i = \frac{1}{k} \sum_{A \subseteq K \setminus \{i\}} \binom{k-1}{|A|}^{-1} (\mathrm{val}_{A \cup \{i\}} - \mathrm{val}_A)$$

[1] Adapté de Iooss (2021); [2] Shapley 1953

[1]

C
p

Dans notre problème

Travailleurs = forçages météo-océaniques + SLR

Production = variance sur Y (volume d'eau)

$$\phi_i = \frac{1}{k} \sum_{A \subseteq K \setminus \{i\}} \binom{k-1}{|A|}^{-1} (\mathrm{val}_{A \cup \{i\}} - \mathrm{val}_A)$$

[1] Adapté de Iooss (2021); [2] Shapley 1953

Adaptation au problème de **sensibilité**

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

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

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

où *K*={1,2,…,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

Adaptation au problème {Y>seuil Y_C}

Target Shapley effects [1]

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

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

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