

Journées Techniques Ouvrages d'Art 2014



Prise en compte de l'incertitude
en analyse de cycle de vie

*Application aux ponts mixtes
acier-béton*

David Grange, André Orcesi SDOA MAST IFSTTAR,
Yannick Tardivel DTITM CEREMA, Adélaïde Feraille
MAST Navier IFSTTAR

Introduction

- Conception optimisée des ouvrages mixtes acier-béton par l'analyse de cycle de vie
- Selon les trois axes du développement durable :
 - Axe économique
 - Axe environnemental
 - Axe sociétal
- Comment intégrer les incertitudes du modèle ?

Sommaire

- I) Enjeu de l'étude
- II) Méthode utilisée et cas d'application
- III) Résultats et discussion

I) Enjeu de l'étude

Analyse de cycle de vie

Economique (ISO 15686)

- Coûts au gestionnaire*
- *Matériaux/ Construction*
 - *Vie en service*
 - *Déconstruction*

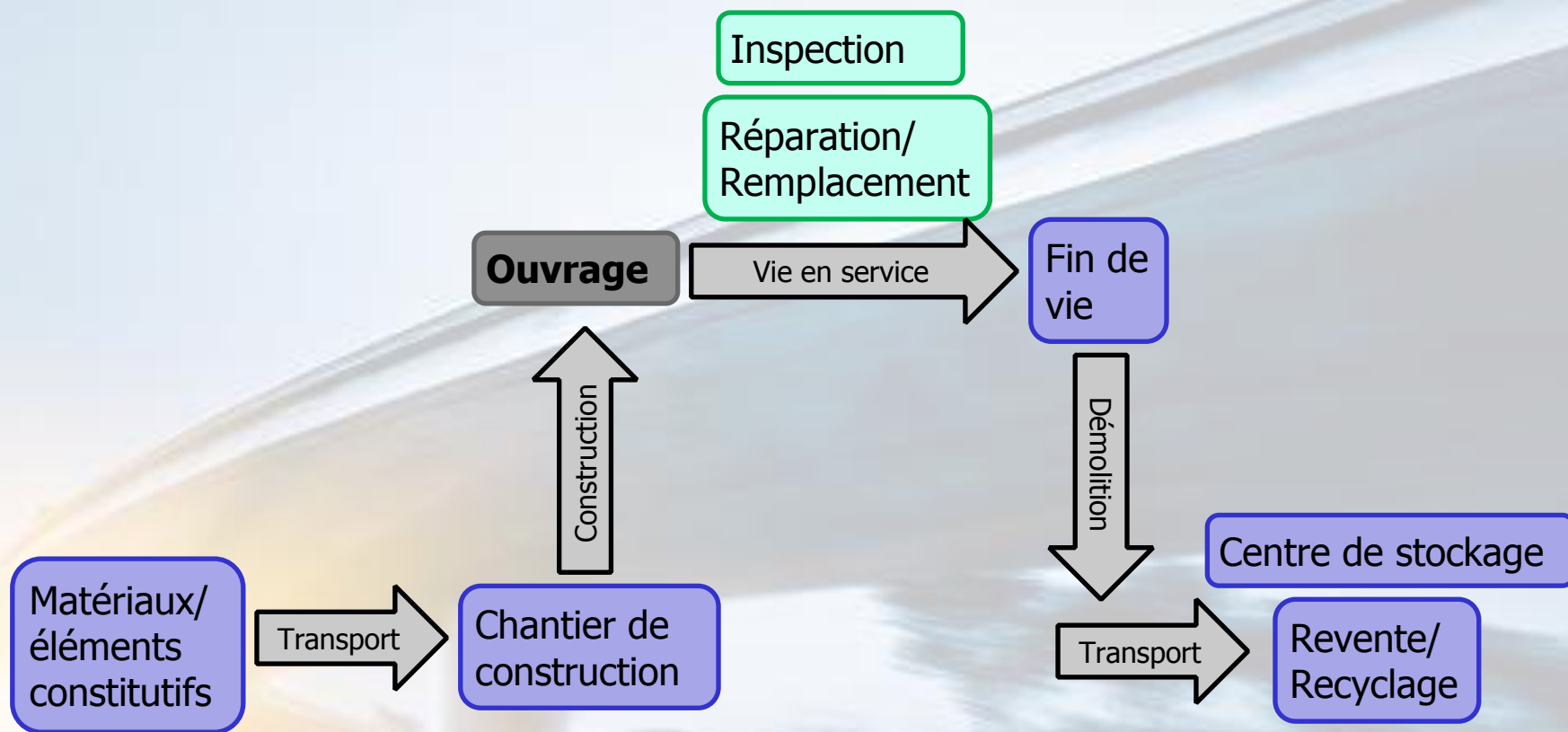
Environnemental (ISO 14040 et NF P01-010)

- *Consommation des ressources énergétiques*
- *Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques*
- *Déchets non radioactifs*
- *Déchets radioactifs*
- *Consommation d'eau totale*
- *Potentiel de changement climatique*
- *Potentiel d'acidification atmosphérique*
- *Potentiel de formation de l'ozone troposphérique*
- *Potentiel d'eutrophisation*
- *Potentiel de toxicité humaine*
- *Potentiel d'écofoxicité*

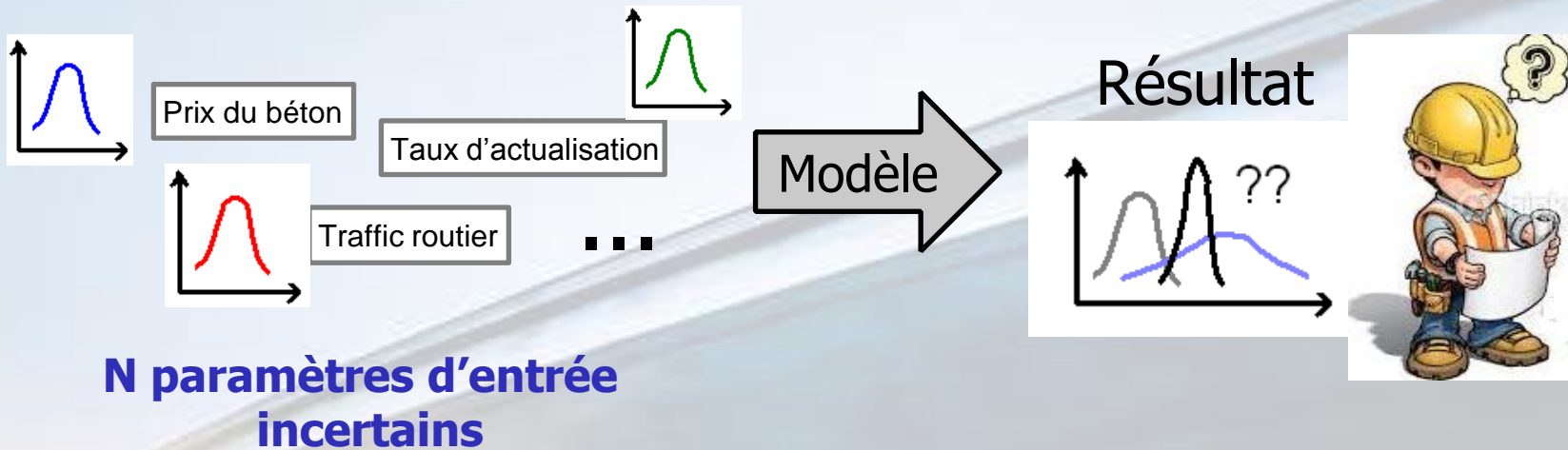
Sociétal

- Coûts aux usager générés par les travaux durant la vie en service.*
- *Coût du temps perdu dans les embouteillages*
 - *Coût des accidents engendrés.*

Analyse de cycle de vie : frontières de l'étude



Comment prendre en compte les incertitudes ?



- Quelles variables contribuent le plus à l'incertitude du résultat ?
- Etude particulière pour les variables d'importance prédominante
- Variables dont l'incertitude ne joue pas beaucoup : fixées à une valeur nominale.

Modélisation des incertitudes

Sélection d'un grand nombre de paramètres

Analyse de sensibilité : sélection des paramètres dont l'incertitude joue un rôle important

Pour les paramètres prédominants, modélisation de l'incertitude

~50 paramètres

~5 paramètres

II) Méthode et cas d'application

Cas d'étude : passage supérieur mixte acier-béton bipoutre



- $L = 78 \text{ m}$, $l = 12 \text{ m}$
- Au dessus de l'ouvrage : 2 voies
- Au dessous de l'ouvrage : 6 voies

- Dalle en béton pré-fabriquée
- Utilisation de travées de rives comme contrepoids

Cas d'étude : passage supérieur mixte acier-béton

Source des données :

- Projet SBRI : Sustainable Steel Composite Bridges in Built Environment.
- Modèle de congestion du trafic : *Queue Work Zone -98 (1)*

(1) : Texas Transportation Institute

Etude de deux variantes technologiques

Variante 1 : poutres en acier classique

- Couche anticorrosion
- A entretenir et changer
(~ 2 changements en 100 ans)

Variante 2 : poutres en acier autopatinable

- Légère sur-épaisseur d'acier lors de la construction

Performance des deux variantes, en prenant en compte les incertitudes ?

Analyse de sensibilité

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Coût de cycle de vie
Impact sur les usagers
Impact environnemental

N variables « incertaines »

- manque d'information
- variabilité dans l'espace/le temps

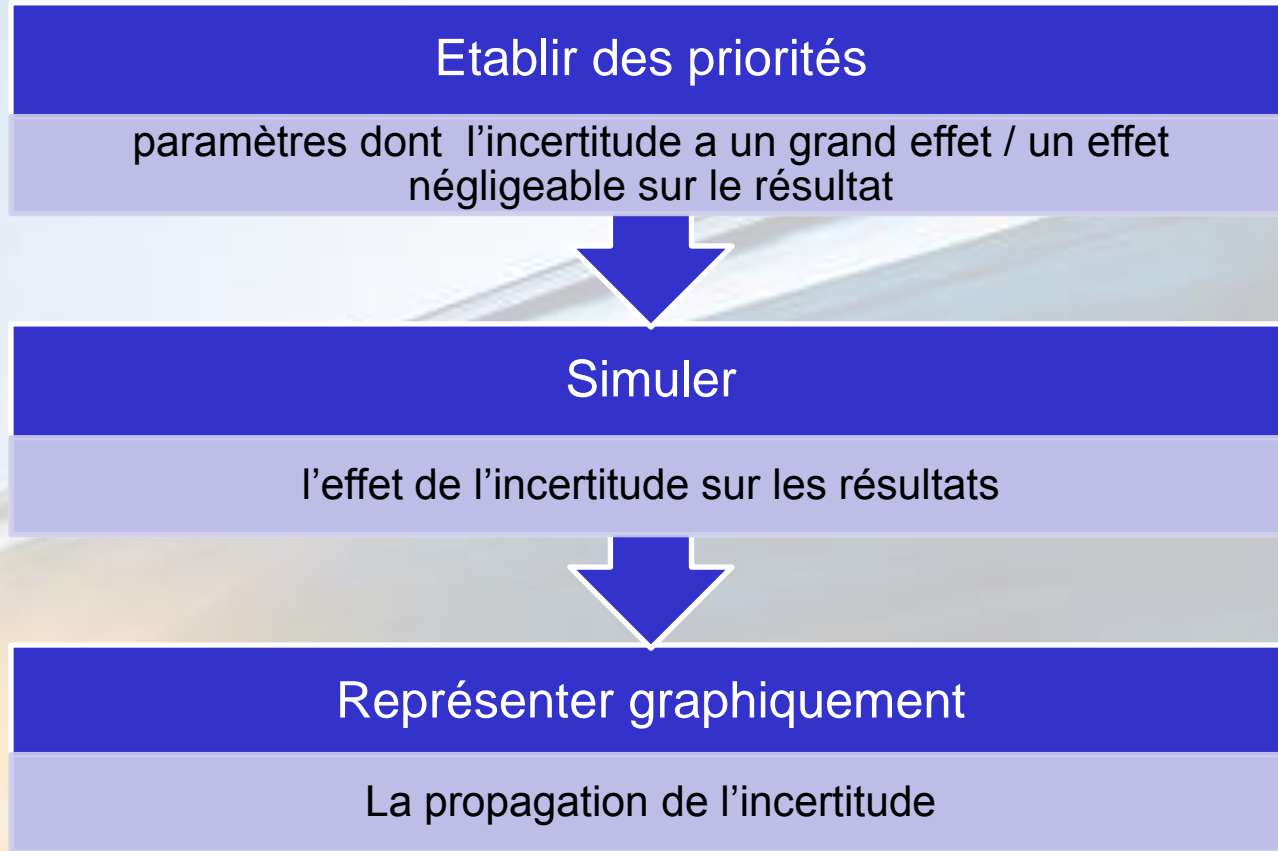
Quelles sont les variables qui contribuent le plus à l'incertitude **du modèle**?

X_i contribue beaucoup à l'incertitude

- recherche d'information supplémentaire
- prise en compte de l'incertitude

X_i est moins influente

- fixée à une valeur nominale



Analyse de sensibilité par étude des indices de Sobol

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$$S_i = \text{Var}(E[Y|X_i]) / \text{Var}(Y)$$
 indice de sensibilité de Sobol
du premier ordre de X_i

$$(S_1 + \dots + S_n) \leq 1$$

- variables X_i supposées indépendantes
- en cas de forte dépendance, regroupement des variables en « cluster » indépendants

+ : application très vaste (modèle non linéaire, non monotone ...)
- : grand nombre de simulations nécessaires

Méthode FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test)

$$Y = f(X) = \sum_{k_1, k_2, \dots, k_n} C_{k_1, k_2, \dots, k_n} e^{2\pi j(k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n)}$$

$$C_{k_1, k_2, \dots, k_n} = \int_{I^n} f(X) e^{-2\pi j(\vec{k} \cdot \vec{x})}$$

$$E[Y|X_i] = \sum_{k_i \neq 0} |C_{0, 0, \dots, k_i, \dots, 0}|$$

Calcul d'une intégrale multidimensionnelle

Méthode FAST

$$x_i(s) = \frac{1}{2} + \arcsin(\sin(\omega_i s))$$

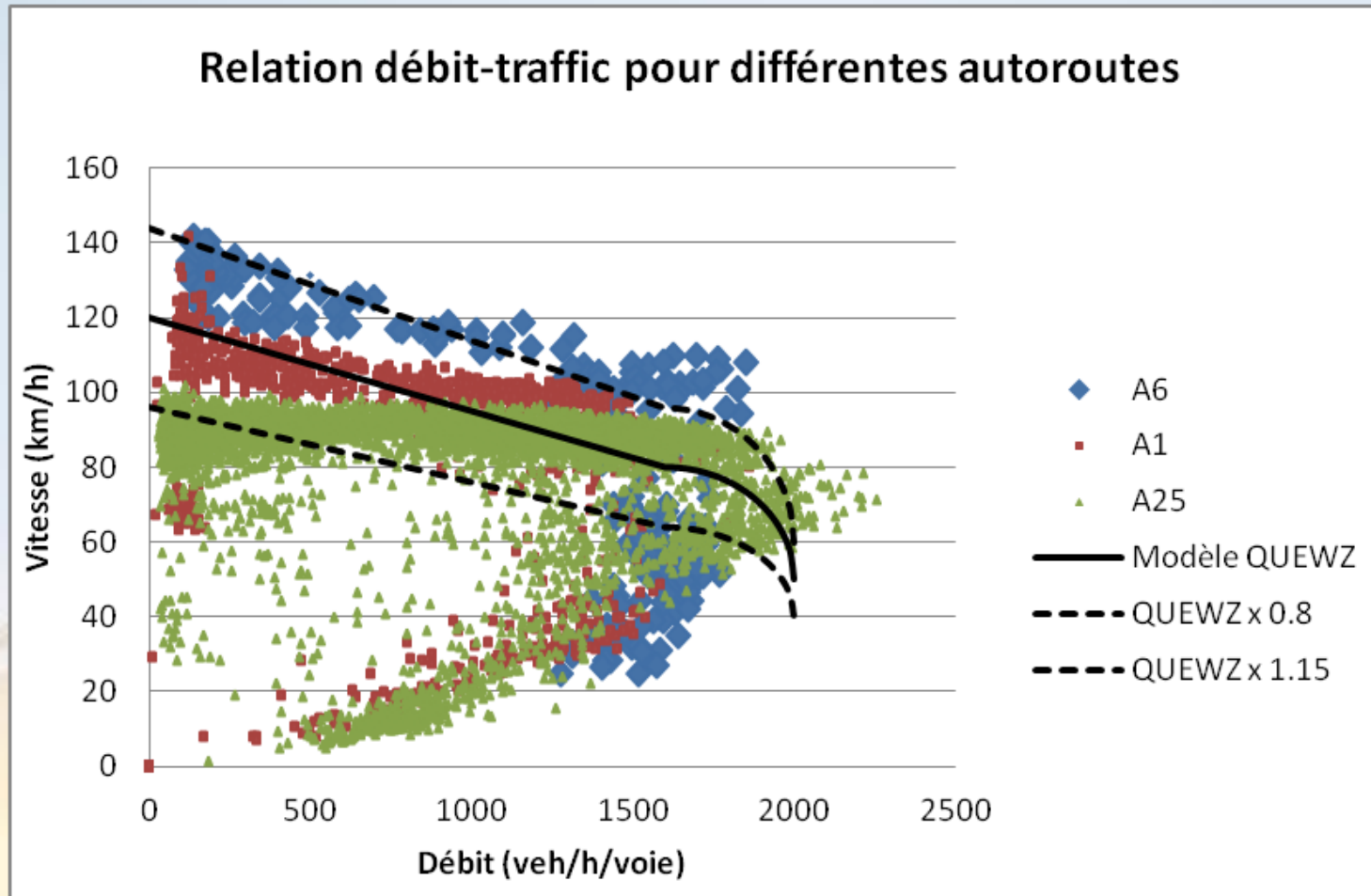
$$C_{0, 0, \dots, k_i, 0, \dots, 0} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) e^{-2\pi j k_i \omega_i s} ds$$

Intégrale 1D

Source : Cannavó, F. (2012). Sensitivity analysis for volcanic source modeling quality assessment and model selection. *Computers & Geosciences*, 44, 52-59.

Modélisation des incertitudes : lois uniformes

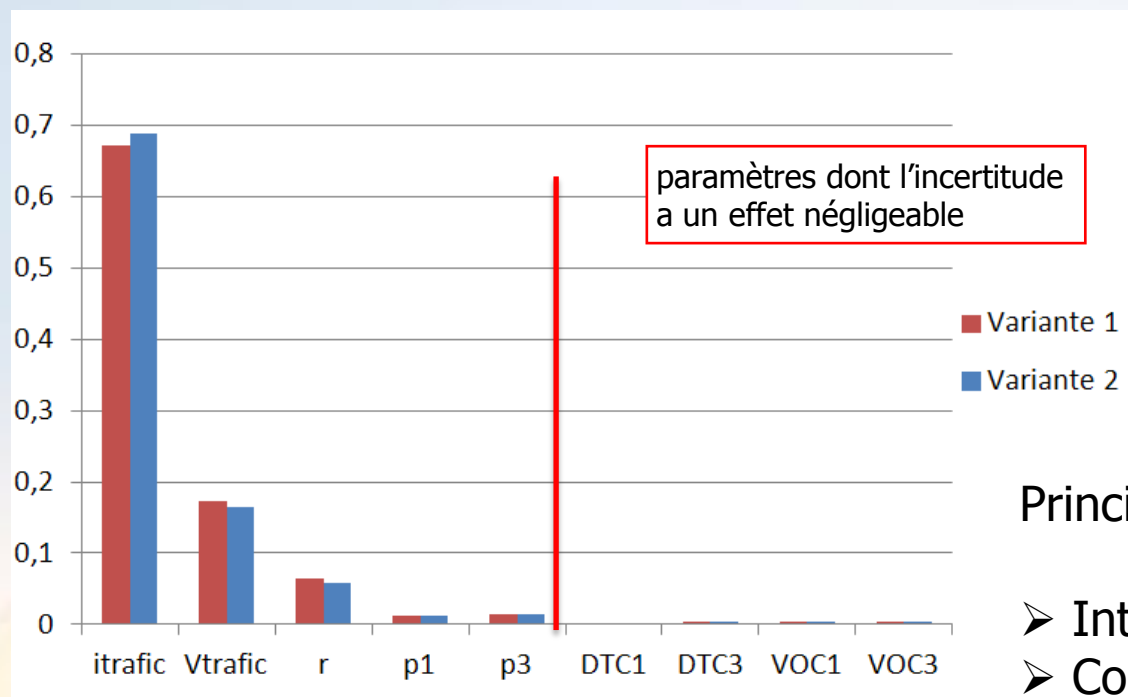
- Taux d'actualisation : [1.8%,2.2%]
- Prix du béton et de l'acier : prix minimum et maximum calibrés avec 10 appels d'offres récents.
- Débit de voitures : minimum et le maximum déterminés avec un échantillon de 3 autoroutes : A6, A10 et A25.
- Paramètres pour lesquels on n'a pas d'information : lois uniformes (moyenne $\pm 20\%$).



Contribution à une méthodologie d'ACV – D.G., A.O., A.F, Y.T.

III) Résultats et discussion

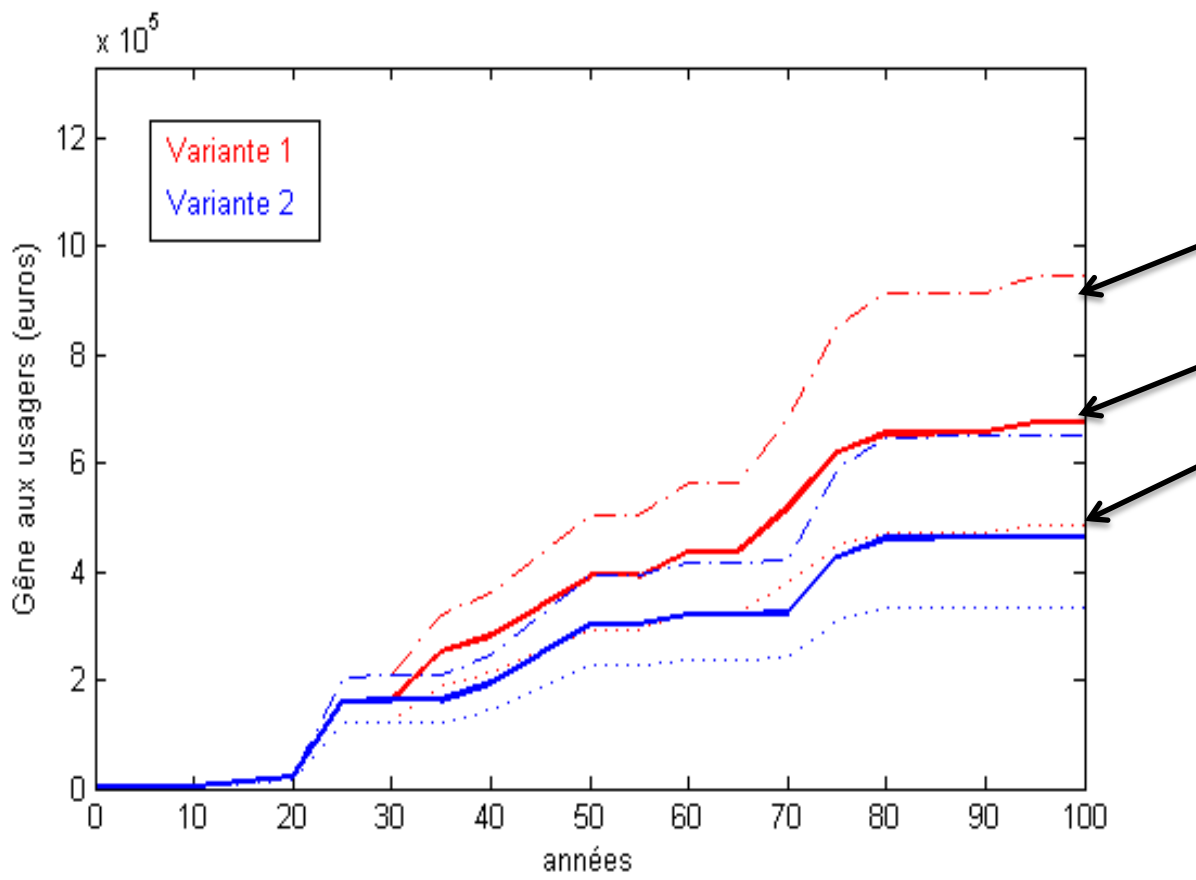
Indices de Sobol pour le coûts aux usagers



Principales causes de l'incertitude :

- Intensité du trafic
- Courbe débit trafic
- Taux d'actualisation
- Pourcentage de voitures/camions

Coût aux usagers en fonction du temps

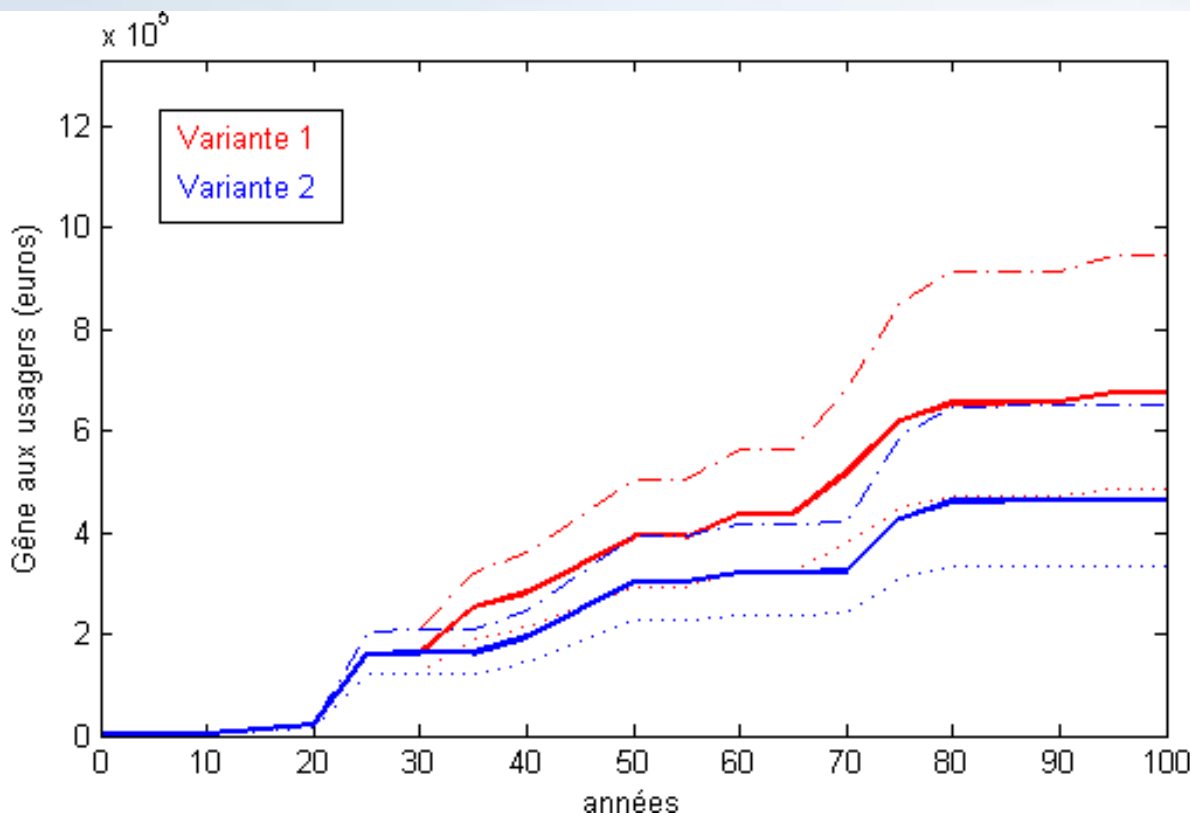


3e quartile
(75% des cas au dessous)

Prix médian

1^{er} quartile
(75% des cas au dessus)

Coût aux usagers en fonction du temps

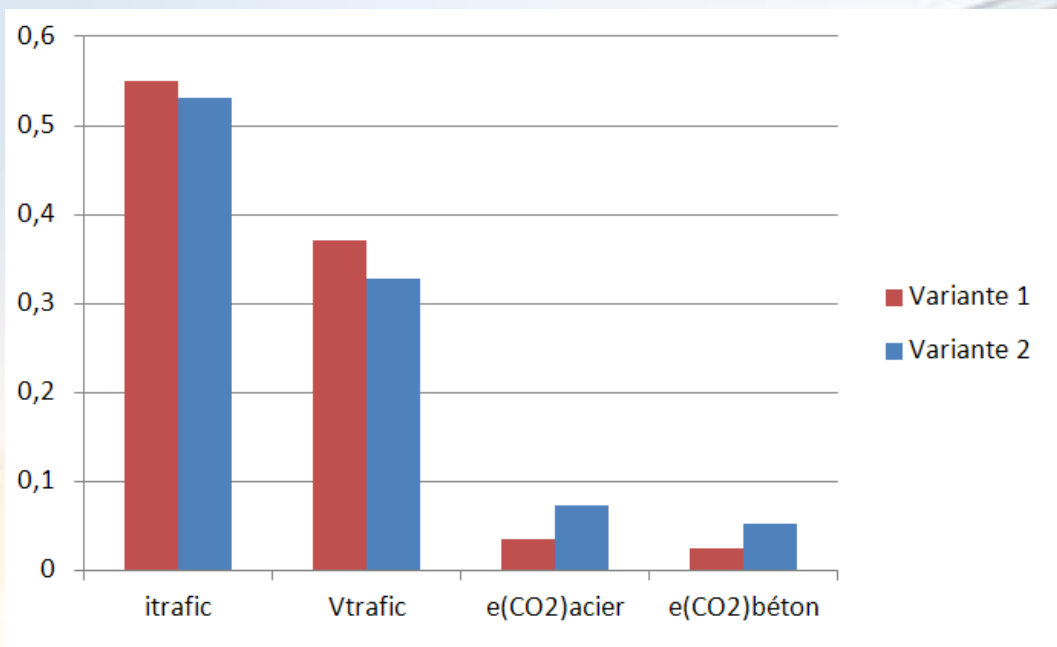


- Coût de l'ordre de 500 000 €
- Solution avec acier autopatinable à un impact inférieur de 30% (embouteillage lors des travaux de remplacement de la couche anticorrosion)
- Forte dispersion

Conclusion : prix difficilement prévisible dans l'absolu
On peut néanmoins comparer deux solutions technologiques

Potentiel de changement climatique (kg eq. CO2)

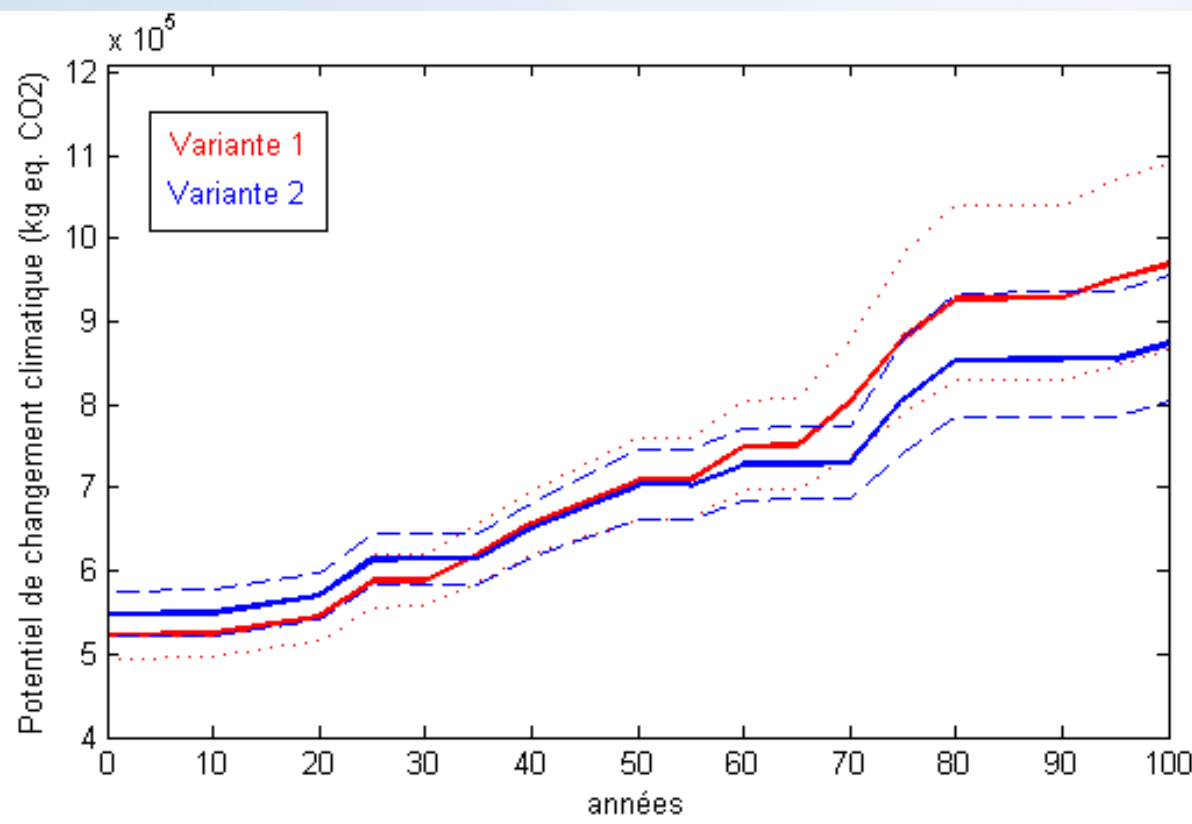
Indices de Sobol



Poids des paramètres dans l'**incertitude** du résultat

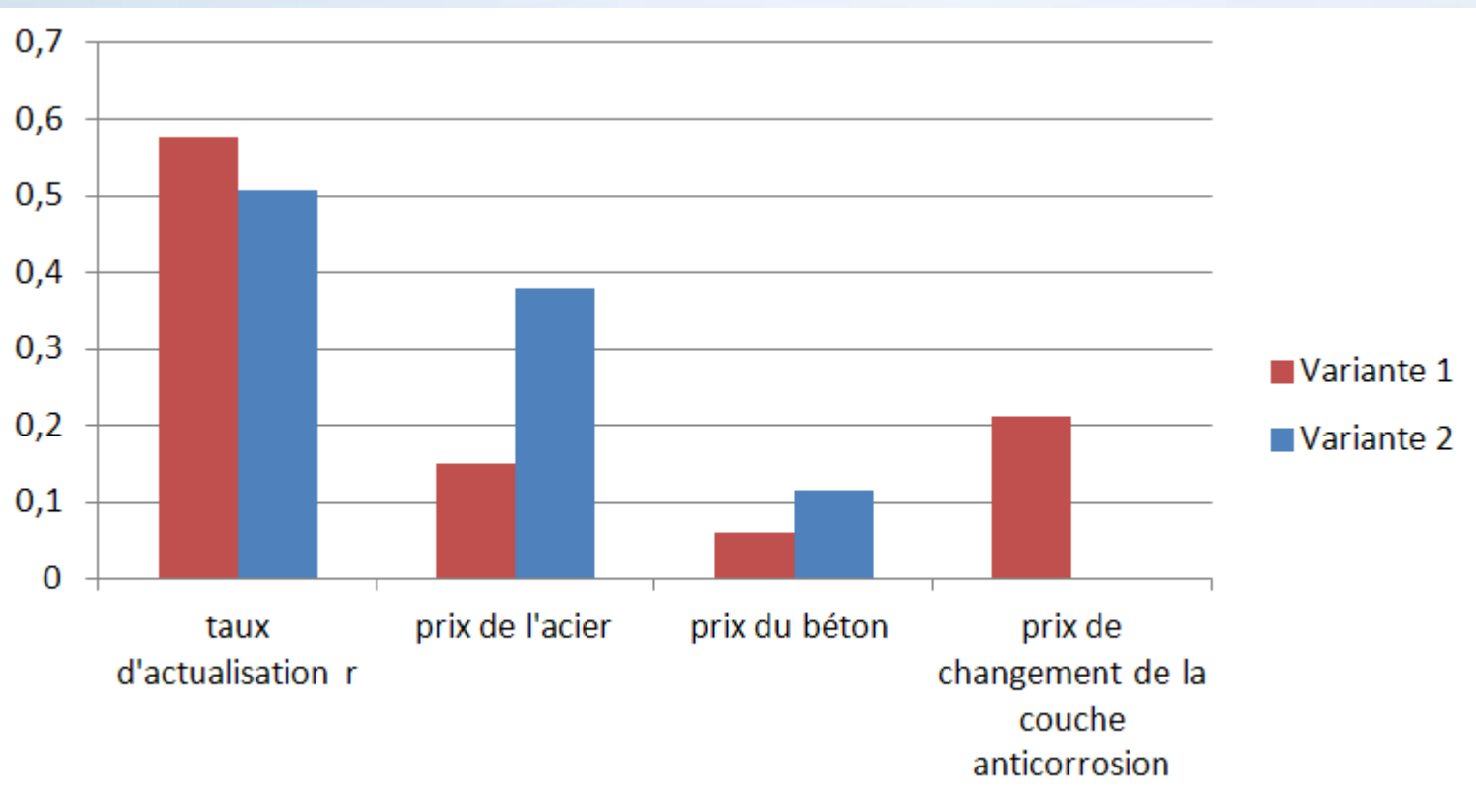
Parmi les facteurs retenus, 4 paramètres influent sur le potentiel de changement climatique

Potentiel de changement climatique



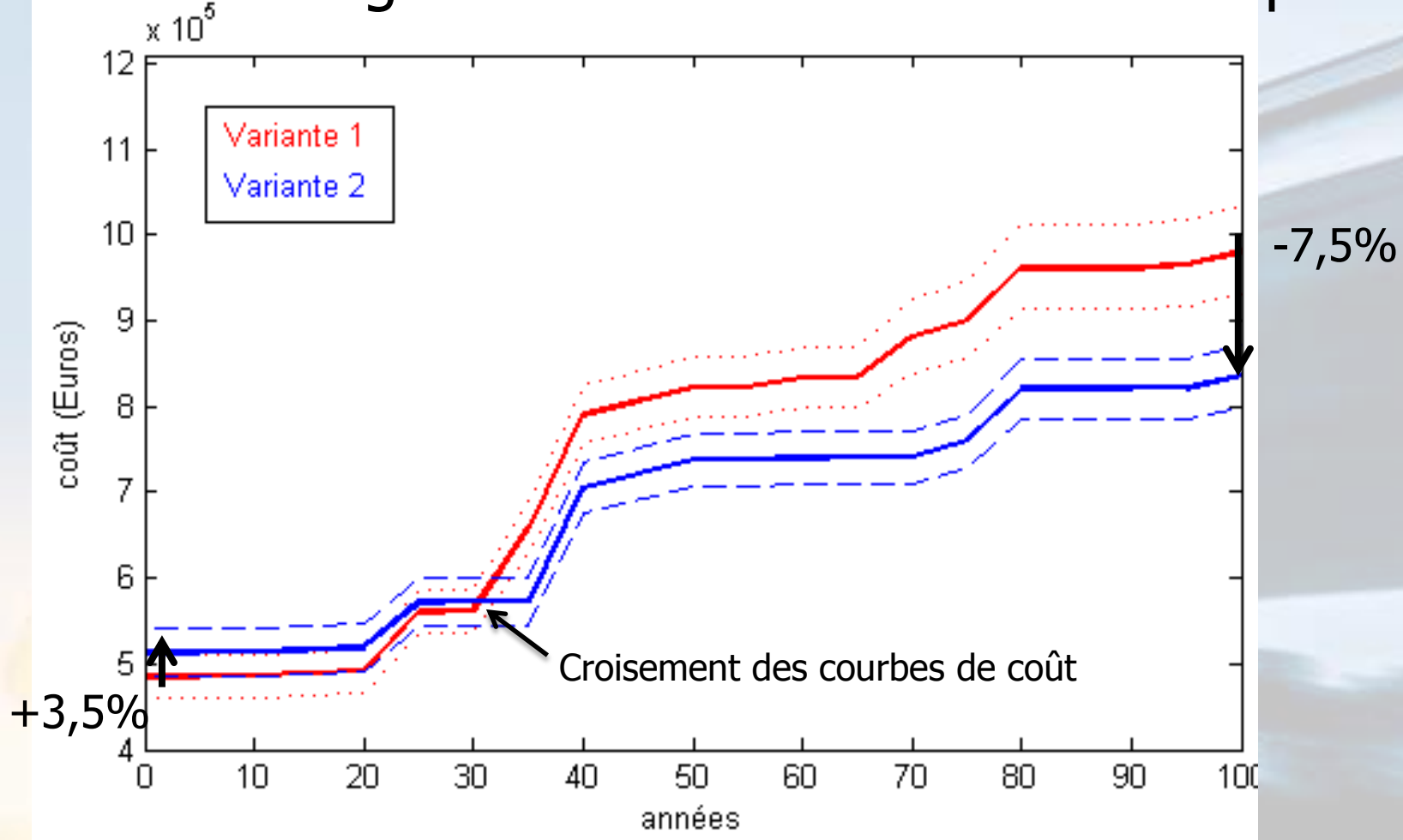
- Solution avec acier autopatinable émet plus de CO₂ à la construction
- Inversion au cours de la vie en service (au bout de 30 ans)
- Rôle prédominant des opérations de maintenance sur l'incertitude du résultat

Indices de Sobol pour le coût de cycle de vie



Parmi les facteurs pris en compte, seulement trois d'entre eux influent sur le coût de cycle de vie

Coût au gestionnaire en fonction du temps



Conclusions

Méthodologie face à l'incertitude :

- Cibler les paramètres clés
- Visualiser l'influence de l'incertitude sur le résultat

Limites :

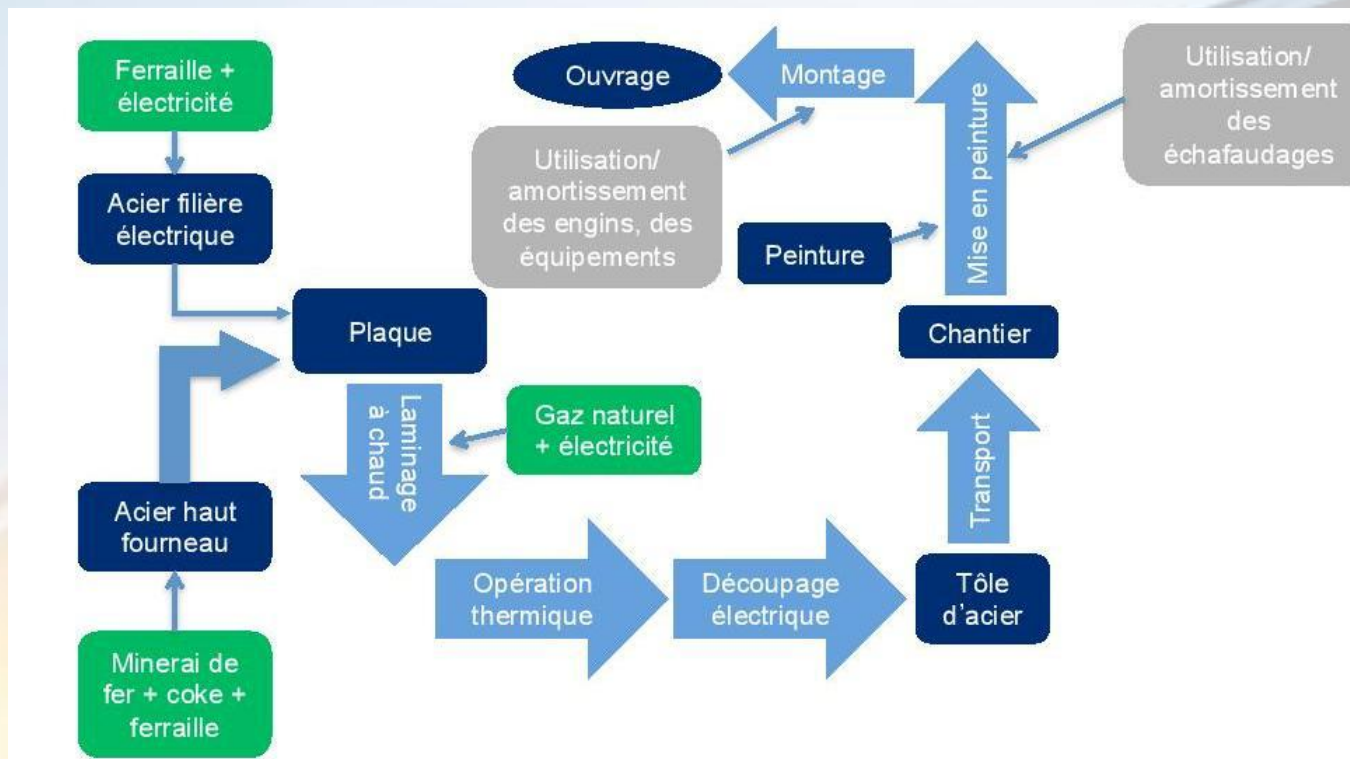
- Manque d'information sur un paramètre : parfois pas plus d'information sur son incertitude (prise de marges)
- Tout n'est pas modélisé : caractère dangereux des déchets de peinture, événements non prévu, caractère local de chaque chantier ...

Merci pour votre attention

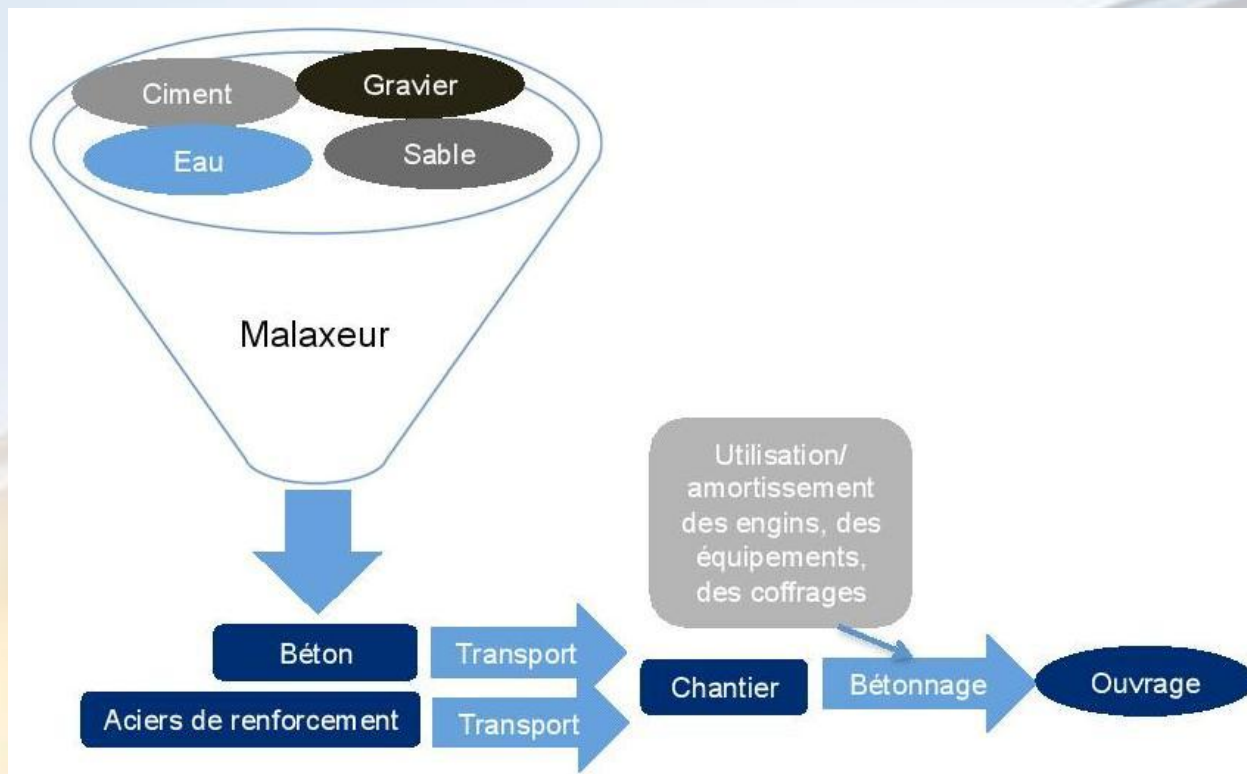


Annexes

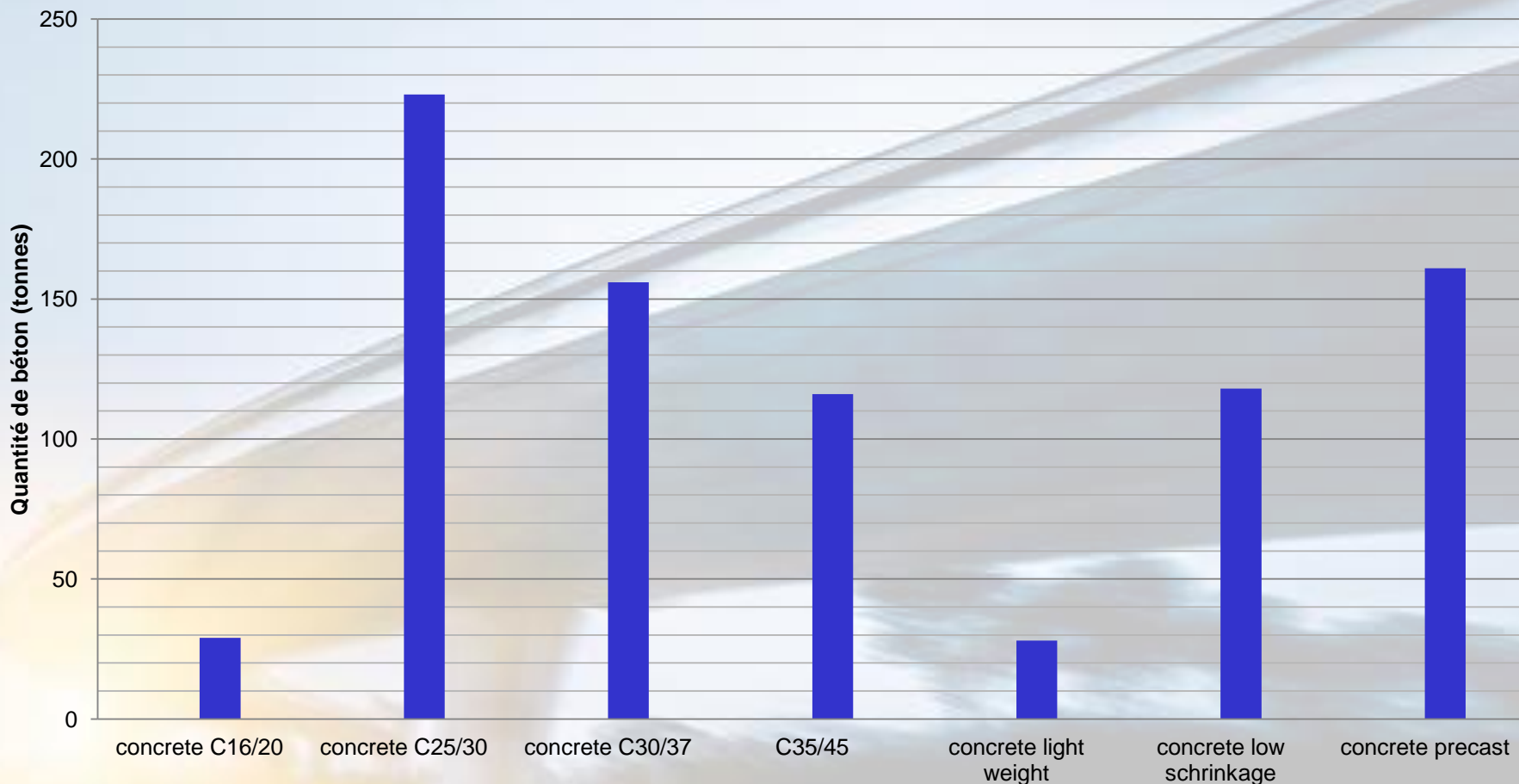
Processus pris en compte pour la production d'acier structurant



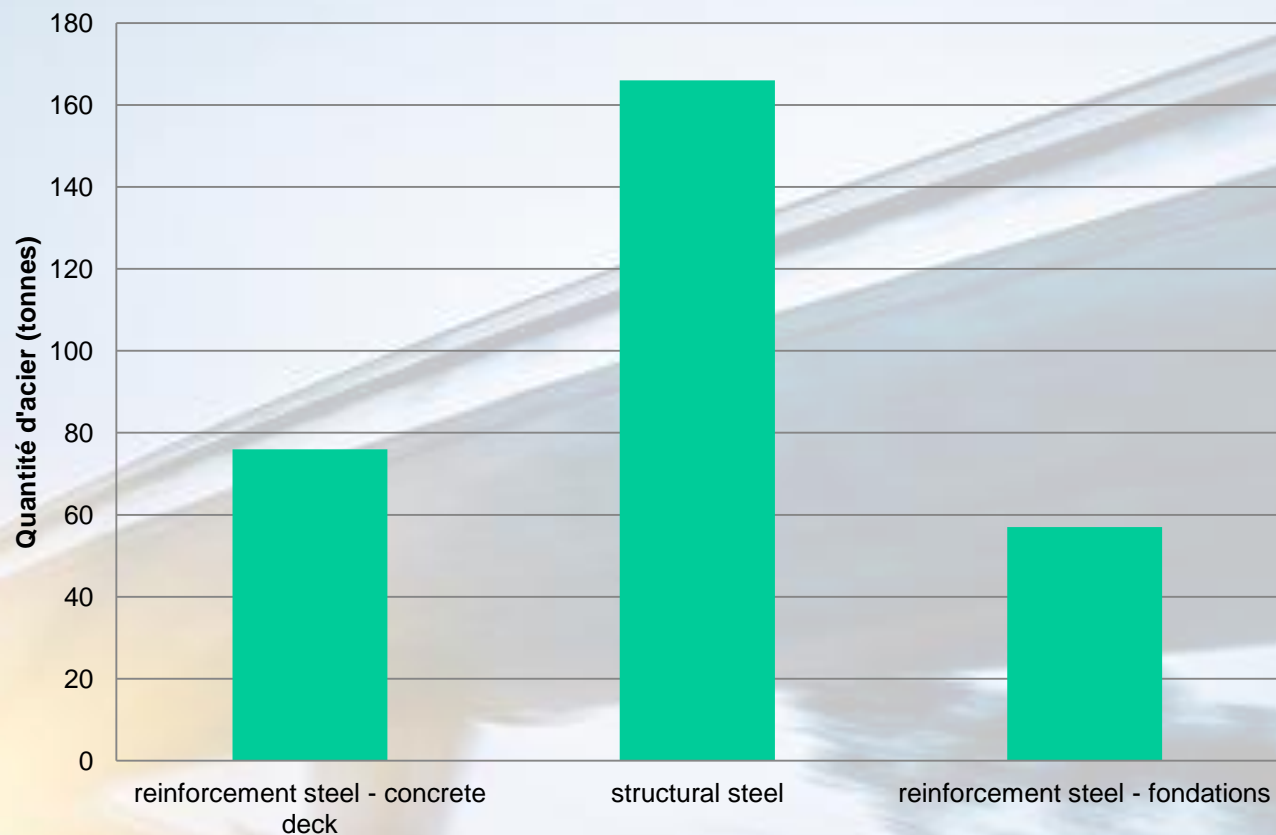
Processus pris en compte pour la production du béton



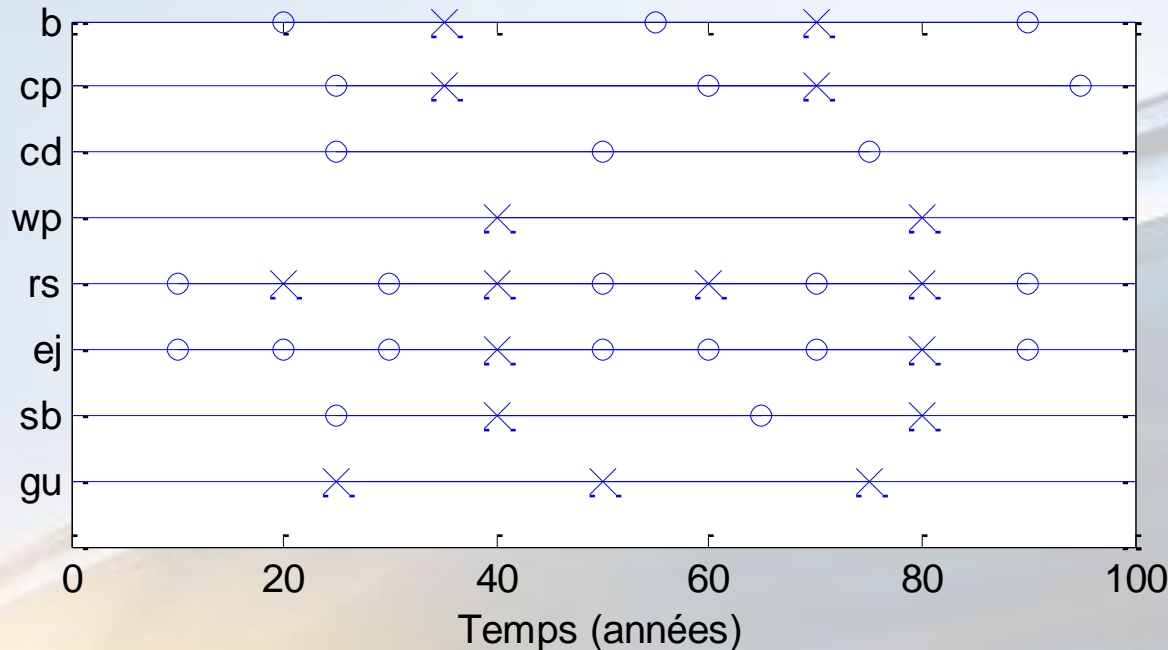
Quantité de matériaux utilisés : béton



Quantité de matériaux utilisés : acier



Calendrier de maintenance



b=appareils d'appui, cp=protection anticorrosion, cd=dalle en béton, wp=étanchéité, rs=chaussée, ej=joints de chaussée, sb=barrières de sécurité, gu=caniveau

o=réparation, x=remplacement