



**HAL**  
open science

## Vers une cosimulation multi-physique interactive – le projet COSIMPHI

J.-B. Videau, Benoit Delinchant, Abbass Raad, Laurence Cornez, Rémi Wrona, Mathieu Thorel, E. Bozonnet, Simon Bailhache, Galdric Sibiude

► **To cite this version:**

J.-B. Videau, Benoit Delinchant, Abbass Raad, Laurence Cornez, Rémi Wrona, et al.. Vers une cosimulation multi-physique interactive – le projet COSIMPHI. Conférence Francophone de l'International Building Performance Simulation Association (IBPSA France 2018), May 2018, Bordeaux, France. pp.75-82. hal-02014889

**HAL Id: hal-02014889**

**<https://hal.science/hal-02014889v1>**

Submitted on 12 Feb 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Vers une co-simulation multi-physique interactive – le projet COSIMPHI

Jean-Baptiste Videau\*<sup>1</sup>, Benoit Delinchant<sup>2</sup>, Abbass Raad<sup>2</sup>, Laurence Cornez<sup>3</sup>, Rémi Wrona<sup>4</sup>, Mathieu Thorel<sup>1</sup>, Emmanuel Bozonnet<sup>5</sup>, Simon Bailhache<sup>1</sup>, Galdric Sibiude<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Est, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Marne-la-Vallée, France

<sup>2</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000 Grenoble, France

<sup>3</sup> CEA/DRT/LIST/DM2I/LADIS, CEA Saclay, Bât 565 PC192, 91191 Gif-sur-Yvette

<sup>4</sup> TRIBU ENERGIE

<sup>5</sup> Université de la Rochelle, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LASIE)

<sup>6</sup> Be Green Engineering

\*[jean-baptiste.videau@cstb.fr](mailto:jean-baptiste.videau@cstb.fr)

---

### RESUME.

Cet article présente les travaux réalisés dans le cadre du projet ANR COSIMPHI visant à développer un outil de co-simulation multi-physique (acoustique, coût, éclairage, énergie-confort d'été, environnement) interactive, cohérent scientifiquement et techniquement, pour améliorer le processus de conception.

Dans les travaux réalisés, la mise en cohérence de la description du bâtiment a été réalisée à travers un Modèle de Données Pivot, description commune aux cinq outils métiers du projet, compatible à la fois avec les maquettes numériques et avec une base de données (BDD) multi-physiques. Ces entrées alimentent une plate-forme de co-simulation. Un orchestrateur, également développé en Web Service (WS), gère les appels des outils métier et transmet les informations d'un outil à l'autre. Enfin, un module d'optimisation basé sur les algorithmes génétiques, un module de règles expertes basé sur la logique floue et un module d'aide à la décision multicritères sont capables de fournir au concepteur des informations quantitatives et qualitatives sur ses choix de conception.

MOTS-CLÉS : co-simulation multi-physique, optimisation multi-critères, règles expertes.

---

### ABSTRACT.

The project COSIMPHI, supported by the French National Research Agency (ANR) has been dedicated to multi-physics simulation to simultaneously consider acoustics, lighting and thermal comforts and energetic, environmental and economic performances in building design process. The development in this project brings a prototype of a multi-physics simulation tool linked to an optimization and decision-making support system. The works have been revolved around three axes: data structuration, multi-physics simulation and decision-making support and multicriteria optimization.

This paper presents the methodology applied and the results obtained. Firstly, discussions between each expertise (acoustics, lighting, energetic, environment, economic) lead to a common dataset considering data of each tool. Then, efforts have been focused on co-simulation to correctly orchestrate each thematic tool. This orchestrator assumes the link between component and equipment database and thematic tools, and then provide the results to the optimization and decision-making support system.

KEYWORDS: multi-physics co-simulation, building design, optimization

---

## 1. INTRODUCTION

L'équipe en charge de la conception d'un bâtiment doit faire face à un nombre important de contraintes, notamment dans les domaines des confort acoustique, visuel et thermique des occupants, des consommations d'énergie et des performances économique et environnementale. Le projet COSIMPHI (subventionné par l'Agence Nationale de la Recherche depuis 2013) promeut une approche intégrée basée sur trois concepts principaux : l'utilisation d'un unique jeu de données pour décrire le bâtiment de manière non-redondante, le développement d'un outil de co-simulation en web service (WS) pour évaluer les impacts croisés des choix de conception et limiter les itérations entre les concepteurs, et enfin la production d'un support d'aide à la décision, d'optimisation multicritères et d'une interface (IHM) pour aider les concepteurs à analyser les indicateurs calculés et à prendre des décisions pertinentes en regard de leur(s) objectif(s). L'objectif de cet article est de présenter les techniques de modélisation et co-simulation multi-physiques des bâtiments du projet COSIMPHI, en détaillant les choix méthodologiques réalisés, en présentant les premiers résultats et en faisant une analyse critique de la preuve de concept développée.

## 2. CONTEXTE ET VEROUS SCIENTIFIQUES

### 2.1. LA PRATIQUE COURANTE DE LA CONCEPTION

Les outils de chaque métier (acoustique, éclairage, énergie-confort d'été, environnement, coût) sont indépendants et très souvent manipulés par des acteurs différents. En effet, les domaines d'expertise en lien avec ces outils sont variés et nécessitent de faire appel à des bureaux d'étude ou des services centralisés spécialisés sur chaque thématique. De fait, la cohérence entre les métiers n'est pas assurée de manière automatique et repose alors sur la communication et l'itération entre les acteurs sans garantie aucune. Selon les niveaux d'information sur un projet et en fonction de contraintes réglementaires, il est également possible que certains calculs soient dus dans des temporalités différentes. Cela tend à limiter la recherche de compromis multicritères potentiellement plus pertinents si l'ensemble des métiers étaient considérés suffisamment en amont et avec une vision intégrée.

### 2.2. LES VEROUS A LEVER

L'approche intégrée poussée dans COSIMPHI a pour objectif en premier lieu de limiter les itérations entre les différents métiers lors de la phase de conception. L'idée est de passer d'une conception séquentielle et indépendante (on fait un choix pour un métier, on l'applique, on transmet à un autre métier) à une conception liée et interdépendante.

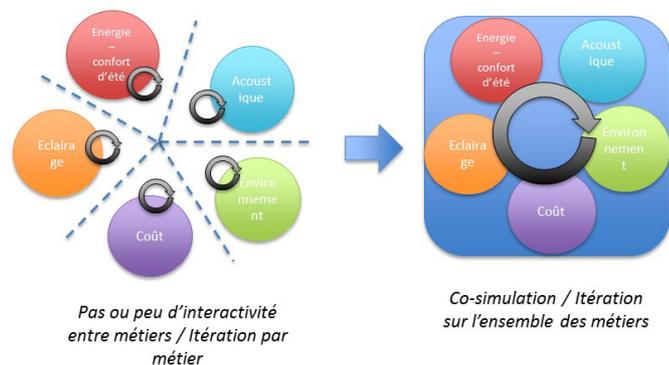


Figure 1 : l'approche intégrée (source : COSIMPHI)

Pour réaliser un tel outil, plusieurs verrous scientifiques doivent être levés avec l'objectif de faciliter la modélisation du bâtiment en phase conception : comment décrire un bâtiment de manière unique, simple et opposable pour tous les outils métier tout en gardant la compatibilité avec les formats de maquette numérique comme l'IFC ou le cityGML ? Comment développer une plateforme de co-simulation pérenne, pouvant gérer les différents pas de temps nécessaires aux simulations en utilisant des méthodes de couplages adaptées ? Comment gérer les temporalités différentes de chacun des outils métiers ? Quelles informations remonter à l'équipe de conception dans ce contexte complexifié et comment l'aider, d'une part à prendre des choix éclairés, d'autre part à évaluer leurs conséquences sur tous les métiers ?

### 2.3. LE CAS TEST

Pour tester et valider la preuve de concept COSIMPHI, le cas d'étude de « la salle de classe » a été choisi.

La conception et la modélisation de ce local introduit des problématiques dans chacun des métiers traités dans COSIMPHI (éviter l'éblouissement, assurer le confort thermique des occupants, maîtriser les coûts, réduire les impacts environnementaux, limiter l'énergie consommée, limiter le niveau sonore à l'intérieur du local, etc.).

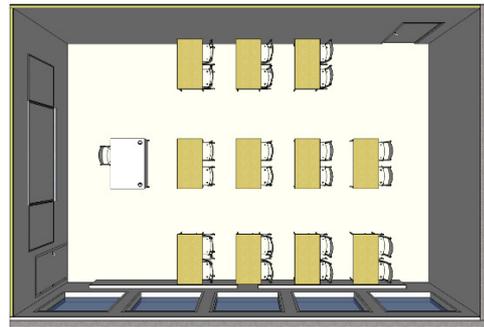


Figure 2 : le cas test - la salle de classe

## 3. LES DEVELOPPEMENTS METHODOLOGIQUES

Pour lever les verrous identifiés, les développements méthodologiques se structurent en trois axes principaux : un travail sur les entrées-sorties des solveurs, un travail sur la plateforme de co-simulation, et enfin un travail sur l'optimisation, les règles expertes et le classement des solutions.

### 3.1. AXE 1 : LES DONNEES

#### 3.1.1. Les entrées

Lors des phases amont de la conception, les standards internationaux (comme l'IFC ou le cityGML) peuvent s'avérer inadéquats ou trop complexes à manipuler pour une description multi-métier du bâtiment (compléments multiples et potentiellement redondants, absence de lien pérenne entre la maquette numérique et les outils métiers par exemple). Les discussions entre tous les experts métiers (acoustique, éclairage, coût, environnement, énergie-confort thermique) de COSIMPHI ont mené à l'élaboration d'un jeu de données d'entrée commun (JDD), adapté aux problématiques de COSIMPHI. Ce JDD est le plus grand dénominateur commun attendu par les cinq métiers, ce qui présente l'avantage d'une part d'être un gage de non-redondance, d'autre part d'être en premier lieu le reflet du métier. La structure du JDD est présentée dans (Sibiude 2016) et s'appuie sur le standard CityGML. En effet, si le JDD ne reprend pas strictement un format existant de maquette numérique, il est apparu essentiel de s'en rapprocher pour faciliter l'interopérabilité logicielle et favoriser l'ouverture vers la maquette numérique (Brangeon, 2015). Au final, avec ce jeu de données

intermédiaire, un seul couplage entre la maquette numérique et le JDD est à réaliser et à maintenir pour faire une simulation multi-métier.

### 3.1.2. La Base de Données multi-métier

Il s'agit ici de réaliser une BDD multi-métier pour stocker les valeurs des paramètres intrinsèques de chaque objet du JDD (ex : baie, porte, système de ventilation, etc.). Pour chaque objet, entre 3 et 50 variantes ont été définies puis codées dans une BDD, accessible en Web Service. Dans la plateforme COSIMPHI, il est donc possible de remplacer un objet A par un objet B tout en maintenant la cohérence de description des objets. Il en est de même pour le processus d'optimisation : modifier un paramètre intrinsèque du JDD sans modifier tous ceux qui lui sont physiquement liés (ex : capacité calorifique et indice d'affaiblissement acoustique du mur support) conduit à des aberrations de calcul.

### 3.1.3. Les sorties

Dans le processus d'optimisation ou d'aide à la conception, tous les indicateurs n'ont pas le même poids. Pour hiérarchiser ces indicateurs et pouvoir guider efficacement l'utilisateur dans sa conception, deux niveaux d'agrégation sont utilisés : le niveau inférieur correspond à des indicateurs « bruts » calculés au sein d'un outil métier (ex : coût de construction, émission de CO<sub>2</sub>,...), ces variables sont utilisées par les modules d'optimisation et de règles expertes ; le niveau supérieur est une agrégation d'indicateurs métier destinée à donner une bonne compréhension globale à l'utilisateur et aboutit par exemple à l'expression d'une note globale et unique pour qualifier le local (ex : une note de classement acoustique,...).

## 3.2. AXE 2 : LA CO-SIMULATION

Les outils métier considérés sont en réalité des modèles de simulation très hétérogènes. La mise en place d'une cosimulation globale nécessite la mise en œuvre de solutions d'interopérabilité. Nous avons ainsi introduit dans notre plateforme une approche de composition de service Internet, via des web-services, pour les étapes clefs du processus de conception que sont la co-simulation, l'optimisation et l'aide à la décision. (Raad, 2017).

Concernant la cosimulation, nous avons plus particulièrement étudié deux algorithmes de couplage (Chainage et Waveform Relaxation Method (WRM)). Le chaînage (algorithme classique de couplage) assure bien la cosimulation entre des composants hétérogènes à différentes dynamiques (Raad, 2017). Cependant, l'utilisation des web-services comme support de l'interopérabilité peut rapidement conduire à des temps de couplage prohibitifs (Raad, 2015).

En outre, la méthode de relaxation des formes d'ondes (WRM), via un échange complet des formes d'onde, et non plus un échange à chaque pas de temps, permet de réduire le nombre d'appels des différents sous-modèles et ainsi, le temps de calcul global (voir Tableau 1.). Si la période de simulation est plus longue, l'efficacité de la méthode de relaxation des formes d'onde augmente. De plus, certains outils n'offrent pas la possibilité d'interagir avec le modèle à chaque pas de temps, la WRM offre donc un réel potentiel pour l'interopérabilité en co-simulation d'outils métiers préexistants.

<b>Période de Simulation</b>	<b>1 Jour</b>		<b>1 Mois</b>	
<b>Méthode de couplage</b>	WRM	Chaînage	WRM	Chaînage
<b>Nombre d'itération</b>	10	1440	13	43145
<b>Temps de co-simulation via WS</b>	11.2s	12min	4.2min	6h

Tableau 1 : Comparaison des temps de co-simulation des algorithmes de couplage

La Figure 3 montre un exemple de co-simulation entre les web-services Energie, Acoustique et des services de régulation. Ces résultats valident l'architecture de co-simulation par web-service et montrent les possibilités d'une simulation globale intégrant différents solveurs et des mécanismes de régulation multi-physiques.

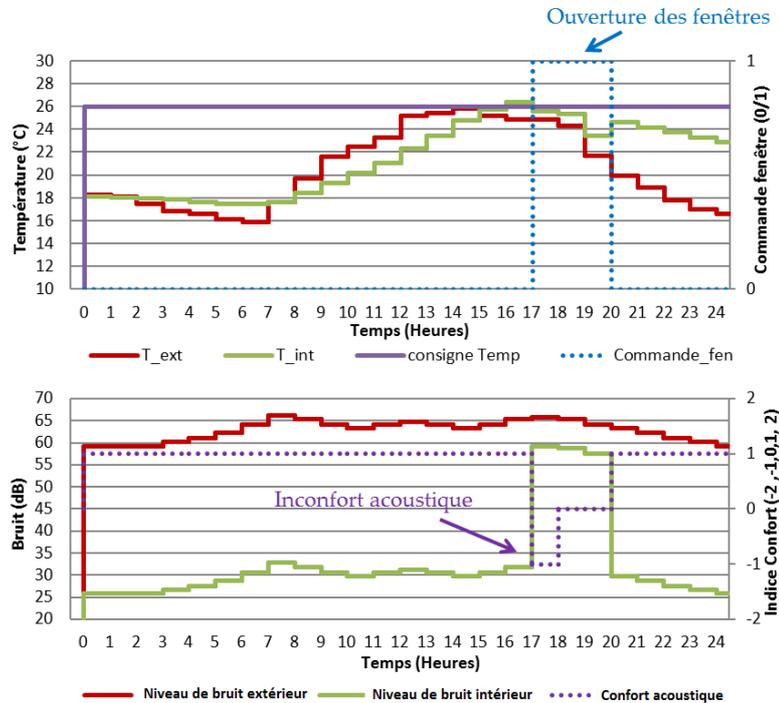


Figure 3 : Co-simulation d'un jour d'été sans régulation acoustique

Ici, l'ouverture des fenêtres le soir par le régulateur thermique, permet de rafraichir l'air mais influe directement sur le confort acoustique. La fenêtre pourrait être refermée par l'activation et la priorisation du web-service de régulation acoustique.

### 3.3. AXE 3 : L'AIDE A LA CONCEPTION

Dans le cadre de la co-simulation multi-physique, les différents simulateurs pris un à un peuvent conduire à des recommandations différentes voire contradictoires. Il est donc important de pouvoir proposer une aide à la conception qui ne rende pas le choix encore plus difficile pour l'utilisateur final. Dans le cas qui nous occupe, les simulateurs ont été analysés un à un avec l'aide des experts métiers afin de dégager les mind maps capables d'associer pour chacun des buts recherchés par l'utilisateur (diminuer les consommations d'énergie primaire par exemple), l'ensemble des éléments bâtis ou équipements (décrits au §3.1.1), et plus précisément à certains de leur paramètres, capables de contribuer au but.

Dans la mind map ci-dessous, présentant la méthode réalisée pour réduire les consommations d'énergie du local ou du bâtiment, certaines restrictions ont été signalées comme la modification des dimensions des baies vitrées (signalées par un triangle danger) et des pistes non explorées (signalées par des croix rouges) comme la diminution des besoins de refroidissement qui ne s'appliquait pas au cas d'étude retenu.

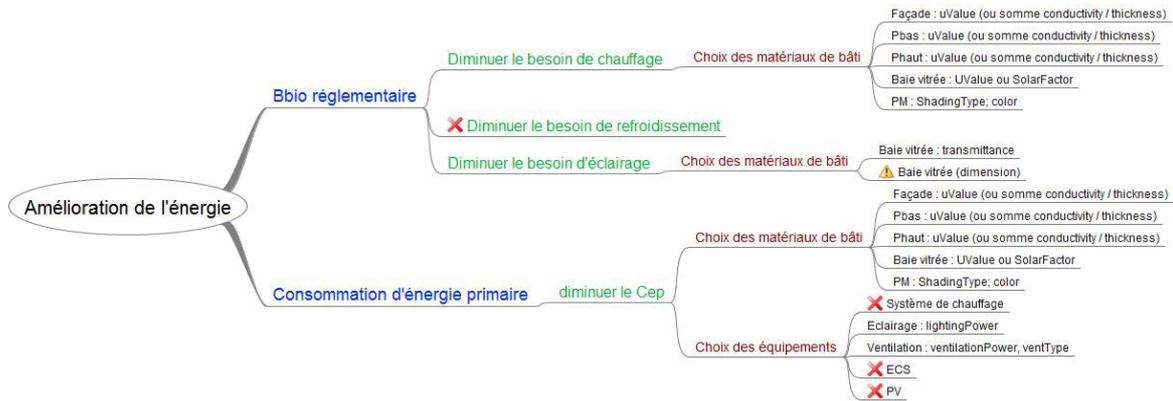


Figure 4 : « mind map » correspondant à l'amélioration de l'énergie

Munis de l'ensemble des mind map, le travail a consisté à construire un ensemble de règles de type « if-then ». Ces règles traduisant la connaissance experte de chacun des domaines ont aussi pour but de proposer des recommandations sur la conception qui soient réalisables par rapport à une BDD de produits. En partant d'une solution initiale qui a été proposée par l'utilisateur (soit un choix pour les éléments de bâti et pour les éléments d'équipement), il ne sera recommandé à l'utilisateur de changer certaines des caractéristiques de sa solution initiale que s'il existe des produits dans la BDD multi-métier le permettant. Les règles floues sont de la forme suivante : « Si  $Bbio_{norm}$  est *non réglementaire* et  $Marge\_uValue\_Floor$  est *faible* alors  $Augmenter\_uValue\_Floor$  est *moyennement* » où  $Bbio_{norm} = \frac{Bbio - Bbio_{max}}{Bbio_{max}}$ , avec  $Bbio_{max}$ , l'exigence sur les Besoins Bioclimatiques de la RT2012, imposée par les contraintes utilisateurs. La mise en œuvre a été réalisée par ExpressIF<sup>TM</sup>, le moteur d'inférence floue développé au CEA, dans lequel ont été défini l'ensemble les variables linguistiques (ici  $Bbio_{norm}$ ,  $Marge\_uValue\_Floor$ ,  $Augmenter\_uValue\_Floor$ ) ainsi que leurs termes associés (ici, respectivement, *non réglementaire*, *faible*, *moyennement*). Le système de règles COSIMPHI se compose 140 règles qui associent 46 variables linguistiques en entrée et 36 en sortie.

Une des limitations vient des simulateurs coûts et environnement qui proposent systématiquement des solutions contradictoires. Pour éviter de perturber trop le processus d'amélioration, il a été décidé de ne pas inclure de règles associées à ces deux simulateurs. Enfin une seconde limitation vient du manque de connaissance des experts en dehors de leur domaine. Plus précisément, un expert est conscient de l'impact dans un autre domaine qu'aura la modification de tel ou tel paramètre mais il ne sera pas capable de quantifier la modification. Le système d'aide à la conception ne mentionne donc que l'ensemble des impacts (négatif, bénéfique, avec impact -sans connaître le sens de l'impact- ou sans impact).

	Energie	Acoustique	Confort estival	Eclairage
$Augmenter\_uValue\_Wall$	NEGATIF	NON	OUI	NON

Tableau 2 : impacts de la règle  $Augmenter\_uValue\_Wall$  sur tous les métiers

## 4. LES PRINCIPAUX RESULTATS

### 4.1. LA PLATEFORME

Chaque module présenté ci-dessus a été mis en WS et intégré dans la plateforme COSIMPHI, dont voici l'architecture.

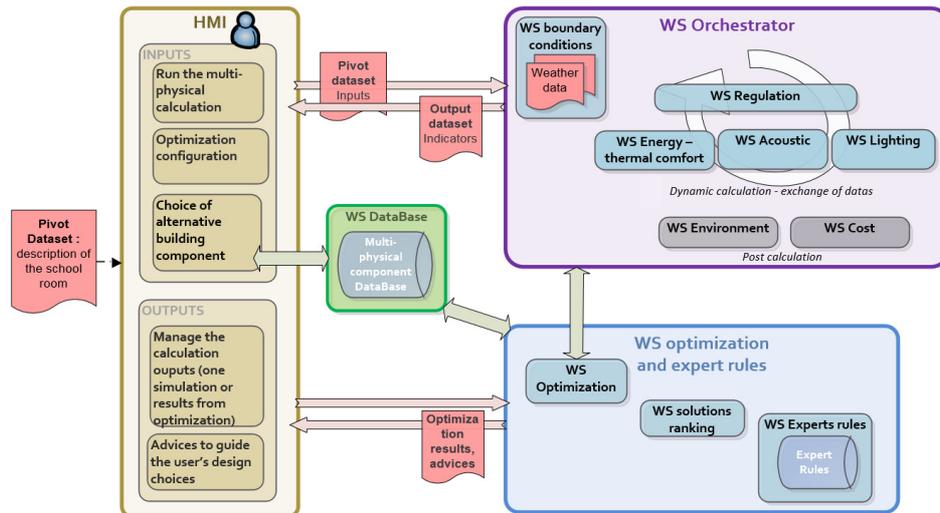


Figure 6 : la plateforme COSIMPHI

#### 4.2. RESULTATS SUR LE CAS D'ETUDE

Les modules du projet COSIMPHI, présentés dans cet article, ont été partiellement intégrés dans un prototype d'outil informatique (Figure 7).

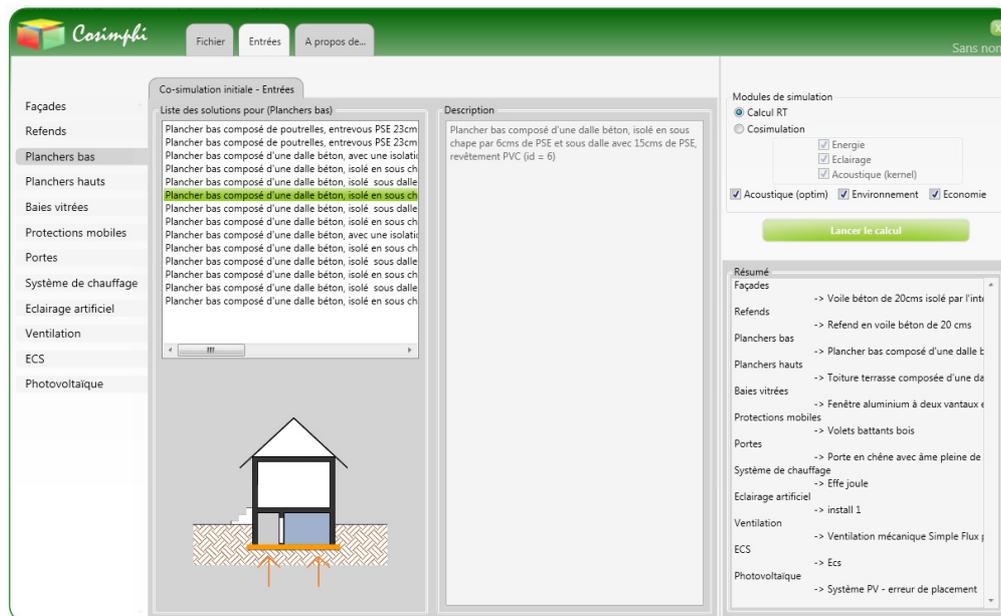


Figure 7 : Interface de saisie des configurations de solutions à appliquer à un bâtiment

Ce prototype n'est pas aujourd'hui pleinement fonctionnel mais il permet de réaliser les tâches suivantes en centralisant les appels de Web Services : chargement des solutions de la base de données de solutions multicritères (cf. §3.1.2), lancement de co-simulations gérant des interactions faibles et fortes, lancement de l'optimisation utilisant les algorithmes génétiques, classement multicritères (utilisant les méthodes de la somme pondérée, TOPIS et PROMETHEE II). La faisabilité technique a été validée, les suites du projet COSIMPHI permettront de consolider le prototype et de tester la méthodologie déployée sur une batterie d'études de cas.

## 5. DISCUSSIONS ET CONCLUSION

La plateforme de co-simulation multi-physique interactive, développée dans le cadre de COSIMPHI, fonctionne sur le cas d'étude (notons l'absence du WS Eclairage dans la plateforme de co-simulation dû notamment au niveau de description d'un local et de son environnement demandé dans Phanie, le simulateur d'éclairage) et peut être lancée à l'aide de l'IHM. Cette plateforme se caractérise par une approche pragmatique proche du (ou des) métiers(s) grâce à la création d'un jeu de données d'entrée commun issu des jeux de données des outils métiers et l'agrégation de connaissance dans le moteur de règles expertes, tout en restant scientifiquement robuste grâce à la co-simulation et la BDD multi-métier et orienté vers l'utilisateur avec l'IHM et le module d'optimisation.

Le chemin vers une commercialisation reste cependant long. La preuve de concept développée révèle qu'il est possible et pertinent de faire de la co-simulation ; que le verrou de la description multi-métier du bâtiment peut être levé par le Jeu De Données commun (JDD), intermédiaire entre le monde de la maquette numérique et le monde des outils métiers ; que l'approche par Web-Service (WS) est efficace et adaptée à des outils très hétérogènes ; et que l'utilisateur ne pourra s'approprier la complexité de l'approche multi-métier qu'avec des outils d'optimisation ou d'aide à la décision. Il nous paraît également indispensable de garder une autonomie entre les outils métiers. La maintenance d'une plateforme multi-métiers est un enjeu majeur (et la première des difficultés) pour assurer sa pérennité. Aussi, il faut que les concepteurs d'outils métiers puissent faire évoluer leur outil sans que sa simulation dans la plateforme multi-métier soit une contrainte.

Plusieurs sujets scientifiques ou organisationnels restent à approfondir comme le développement d'un retour d'expérience utilisateur plus large de la plateforme, l'enrichissement de la BDD de règles expertes pour capitaliser le savoir, le développement de la BDD produits en multi-métier, éventuellement par référencement avec d'autres BDD métier ce qui nécessitera de gérer les différents niveaux de description, la généralisation à des bâtiments ayant un autre usage, des bâtiments plus complexes,... Il est important d'envisager également des outils gérant le cycle de vie des services de la plateforme, comme des outils d'aide à la création et au déploiement des Web-Services, des outils de composition dynamique des co-simulations, des outils de suivi et de débogage des WS...

## 6. BIBLIOGRAPHIE

Sibiude, Galdric, Jean-Baptiste Videau, Benoît Delinchant, Abbass Raad, Samuel Carré, Simon Bailhache, Emmanuel Bozonnet, Boris Brangeon, Rémi Wrona, Benjamin Haas, «Structuration des données pour la Co-Simulation Multi-Physique dans l'évaluation multi-métier des bâtiments» IBPSA France, 2016.

Raad, Abbass, Vincent Reinbold, Benoit Delinchant, Frédéric Wurtz, «Energy building co-simulation based on the WRM algorithm for efficient simulation over FMU components of Web Service» 14th International Conference of the IBPSA, Hyderabad, 2015.

Brangeon, Boris et Emmanuel Bozonnet « Présentation d'un outil d'aide à la conception utilisant les IFC et les bases de données coûts ». Congrès du Bâtiment Durable, La Rochelle, 2015

Raad, Abbass, « Co-simulation et optimisation multi-critères en conception de bâtiment, par approche d'interopérabilité de services », Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble Alpes, spécialité Génie Electrique, Décembre 2017.