

Une approche didactique des outils BIM au service de la durabilité : vers une conception écologique numériquement assistée

BIM tools didactic approach supporting sustainability: Towards digitally aided ecological design

Aida Siala^{*1}, Gilles Halin², et Abdelwaheb Bani^{1,3}

¹Université de Carthage, ED-SIA, 02 rue El Qods 2026 Tunis, Tunisie

²Université de Lorraine, MAP-CRAI, 2 rue Bastien-Lepage, 54000 Nancy, France

³Univesité Ibn Khaldoun, rue Jawdet Al Hayet Chotrana, 2036 Ariana, Tunisie

Résumé. La compétence en Simulations de la Performance Énergétique (SPE) est un atout fondamental pour un architecte. Être capable de lire des résultats de simulation et d'adapter sa conception en conséquence est devenu une capacité essentielle chez les architectes diplômés. Cependant, enseigner la SPE aux étudiants peut être difficile, souvent en raison de la complexité des logiciels et des méthodes, mais aussi de la multitude des informations qui entrent en jeu. Afin de sensibiliser au rôle des outils BIM dans l'amélioration de la performance énergétique, cet article propose et expérimente une approche d'optimisation simplifiée basée sur trois différentes méthodes de simulation. L'expérimentation de ces méthodes a démontré leur capacité à guider la prise de décision vers une conception plus performante et plus respectueuse de son environnement et a suggéré une expérimentation future plus globale de l'approche proposée.

Mots clés. Durabilité, Optimisation énergétique, Simulation de la performance énergétique, Approche didactique.

Abstract. Competence in Energy Performance Simulations (EPS) is a fundamental asset for an architect. Being able to read simulation results and adapt one's design accordingly has become an essential skill among graduate architects. However, teaching SPE to students can be challenging, often due to the complexity of the software and methods, but also the wealth of information that is involved. In order to raise awareness of the role of BIM tools in improving performance energy, this article proposes and experiments a simplified optimization approach based on three different simulation methods depending on the design phase and the level of mastery of the target students. The experimentation of these methods has demonstrated their ability to guide decision-making towards a more efficient design that is more respectful of its environment and has suggested a more global future experimentation of the proposed approach.

* Corresponding author: aida.siala@gmail.com

Keywords. Sustainability, Energy optimisation, Energy performance simulation, Didactic approach.

1 Introduction

La conception durable favorise des espaces de vie plus confortables et réduit considérablement l'empreinte environnementale des bâtiments. La prise en compte de la durabilité durant la phase de conception favorise le bien-être de l'occupant et minimise les besoins en ressources naturelles [5]. Dans une approche traditionnelle de conception, le besoin en informations détaillées sur le projet positionne la réalisation de la Simulation de la Performance Énergétique (SPE) à un stade tardif du processus de conception. Avec l'avènement du BIM, les pratiques ont évolué où les efforts d'optimisation sont investis au début de la conception pour en maximiser les profits. L'usage des outils de simulation est possible du début jusqu'à la fin du projet de bâtiment et le processus de prise de décision est simplifié. Cela est rendu possible à l'aide des modèles et des outils BIM ; à un stade avancé de la conception, les modèles contiennent les informations nécessaires à la SPE (ex. données météorologiques, orientation, données géométriques, charges spatiales, types de construction, propriétés thermiques associées, etc.) et à un stade précoce de la conception ces outils permettent d'intégrer des indicateurs de performance et de simuler le comportement du bâtiment dès les premières ébauches de conception. Cette activité itérative de simulation aide le concepteur à produire une architecture moins énergivore et plus respectueuse de son environnement. Ce potentiel d'optimisation est plus élevé durant les premières étapes du projet, où les impacts des changements et des coûts de construction sont plus faibles (figure 1).

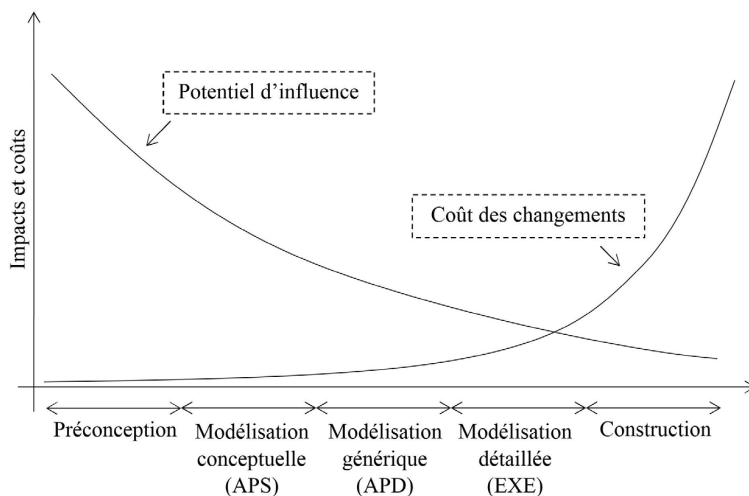


Fig. 1. Impact des décisions sur la performance du bâtiment et sur les coûts de la construction. Inspirée du guide québécois de conception d'un bâtiment performant [8].

La SPE du bâtiment est une activité qui incombe surtout aux ingénieurs et aux thermiciens. Avec le développement des outils BIM, l'intégration des outils de simulation et d'analyse et l'apparition des approches d'optimisation dès les premières étapes de la conception, la SPE est devenue étroitement liée au travail de conception architecturale et ainsi essentielle à la formation des étudiants en architecture. Si l'on veut que les architectes de demain puissent relever les défis de la transition écologique, il est important de sensibiliser les étudiants dès à présent aux méthodes et aux stratégies d'optimisation de la performance énergétique et de les stimuler à agir et à adopter des approches architecturales plus responsables. C'est dans cette perspective que nous avons intégré cette année au cursus de la formation de l'école

d'architecture de l'UIK¹, des efforts de sensibilisation et d'initiation aux approches d'optimisation de la performance. Cet article propose une approche d'optimisation adaptée à l'enseignement de la SPE et relate deux expériences pédagogiques effectuées : l'une concerne l'optimisation durant les premières étapes de conception, dans le cadre de l'enseignement de la modélisation conceptuelle (APS) et l'autre porte, par opposition, sur l'optimisation énergétique durant la phase de modélisation détaillée (EXE). Un retour d'expériences est présenté à la fin de cet article, accompagné d'une analyse critique portant sur l'approche d'optimisation proposée ainsi que sur les méthodes d'enseignement employées.

2 Limites des approches d'optimisation existantes

Les nouvelles technologies de modélisation ne cessent de s'améliorer permettant de générer des formes plus recherchées et plus complexes et la prise de décision devient une tâche de plus en plus difficile à accomplir sans avoir recours aux outils de simulation énergétique pour évaluer et comparer les différentes solutions. Plusieurs chercheurs se sont focalisés sur la problématique de l'optimisation de la performance du bâtiment à un stade précoce du processus de conception en vue de proposer des stratégies et des approches de conception afin d'améliorer le processus. La revue de la littérature permet de distinguer deux principales catégories d'approches :

- Les approches d'optimisation basées sur un flux exploitant des outils de modélisation et des outils de simulation [5, 8, 14, 3] ;
- Les approches d'optimisation reposant sur une modélisation computationnelle permettant d'optimiser des alternatives de conception [11, 1], ou encore de générer des masses paramétriques afin d'explorer des alternatives de conception [17, 18]

La conception est traditionnellement menée en utilisant l'intuition, le savoir-faire et le jugement [19]. Cela met en évidence la nécessité de mesurer et d'évaluer numériquement la capacité de la conception à soutenir l'exploration d'alternatives de conception au moyen de valeurs de performance mesurables comme critères directeurs. La géométrie a un impact énorme sur la réalisation des objectifs liés à la performance [20]. En raison du nombre de paramètres, de nombreuses alternatives de conception sont possibles. Pour cette raison, trouver les solutions de conception les plus optimales est une tâche compliquée en raison du temps et d'autres contraintes. Les techniques d'optimisation computationnelle se sont avérées pertinentes pour soutenir ce processus. Elles sont plus intuitives et précises et sont de plus en plus employées de nos jours pour générer les solutions de conceptions les plus optimales. Toutefois, ces techniques nécessitent un niveau de maîtrise élevé en modélisation computationnelle et des connaissances en langage informatique nécessaires à la création de fragments de codes (ex. pour l'intégration des contraintes du projet, pour la création des formules d'optimisation, etc.). Contrairement à leur efficacité dans l'optimisation de la performance énergétique, ces techniques se montrent moins efficaces et plus difficiles à appliquer en enseignement de l'optimisation de la performance énergétique. Ainsi, pour l'enseignement de l'optimisation de la performance à un stade précoce du processus de conception, nous optons pour les outils de modélisation et de simulation, mais suivant une approche d'optimisation basée sur des étapes instrumentées et précises.

3 Enseignement de la simulation de la performance énergétique

3.1 Paradigme d'enseignement

Les études sur les approches pédagogiques d'enseignement de la SPE se sont multipliées ces dernières années en architecture comme en ingénierie. À travers une revue de littérature

¹ Université Ibn Khaldoun

exhaustive et critique, Alsaadani [2] a distingué trois différents paradigmes d'enseignement selon les prérequis des étudiants et le niveau de maîtrise envisagé par la formation, à savoir :

- L'*expert* : possède une connaissance approfondie de la théorie et de la simulation dans le domaine de la physique du bâtiment. Ce paradigme a pour objectif de former l'étudiant en architecture à devenir un expert en SPE.
- L'*interprète* : possède les connaissances fondamentales pour diriger et interpréter des simulations. Ce paradigme tente de former l'étudiant pour qu'il devienne autonome face à la simulation.
- Le *consommateur* : capable d'interpréter les résultats de la simulation, réalisée par un outil de simulation et de prendre des décisions en fonction de ces résultats.

Avec les méthodes de génération de formes complexes, les outils de simulation sont devenus nécessairement plus complexes, impliquant des modèles mathématiques avancés et des ressources de calcul élevées pouvant analyser différents phénomènes physiques. Cette évolution technologique a en quelque sorte écarté le besoin du professionnel *expert* ou *interprète* en faveur du *consommateur* [7]. Cependant, par manque de connaissances fondamentales, ce dernier est susceptible de générer des prédictions non fiables ou d'avancer de fausses hypothèses de simulation [12]. Il est ainsi nécessaire de former des *experts* ou des *interprètes* même si la profession demande de simples *consommateurs*. Pour former des *experts*, Beausoleil-Morrison [4] a proposé de théoriser l'apprentissage de la SPE en l'intégrant dans le cours de physique du bâtiment, tandis que [7] a proposé de les former avec la pratique, à travers une interaction fluide et progressive avec les outils de simulation. Une approche qui a été ensuite soutenue et approfondie par Gentile [9].

De notre point de vue, l'enseignement de la SPE ne peut pas être envisagé d'une manière complètement théorique. La maîtrise des méthodes de modélisation et de la connexion entre les outils de modélisation et de simulation nécessite forcément un apprentissage par la pratique. Nous rejoignons ainsi Fernandes et Gentile dans l'approche d'enseignement de la SPE par la pratique. Afin d'assurer cet aspect pratique de la formation et ayant conscience que, dans les approches existantes de la SPE, les pratiques de modélisation et de simulation se trouvent étroitement liées, il est nécessaire d'intégrer la formation de la SPE en ateliers d'informatique tout au long du cursus de formation en architecture. Cela permettra d'éveiller chez les étudiants une sensibilité continue aux approches de conception durable. Dans une telle approche, le paradigme d'enseignement doit changer d'une étape à une autre (*consommateur* à *expert*) pour s'adapter aux acquis des étudiants sur les questions énergétiques du bâtiment, mais également en matière de pratiques de modélisation. Ainsi, et en tenant compte de la complexité des outils de simulations, nous soutenons un paradigme d'enseignement évolutif alliant le *consommateur* et l'*interprète*. Cela permet de commencer à introduire la SPE en deux étapes : En cycle licence, où les étudiants n'ont pas encore eu de formation fondamentale sur la performance énergétique du bâtiment². L'objectif à ce stade est de former des étudiants consommateurs à être capables de gérer le flux de travail de conception-simulation permettant d'améliorer la conception. En concordance avec les acquis en atelier d'informatique, cette première initiation à la SPE peut être envisagée en continuité avec l'initiation à la modélisation conceptuelle et/ou schématique (APD) du projet. Une séance d'explication des notions de base de l'énergétique du bâtiment est toutefois indispensable à ce stade. En cycle master, où les étudiants ont déjà acquis une certaine maîtrise de l'activité de conception-simulation et ont eu une formation approfondie sur les fondements théoriques de l'énergétique du bâtiment. À ce stade, les étudiants peuvent passer au paradigme « *interprète* », ainsi ils seront non seulement capables de définir des hypothèses et de prédire des scénarios d'optimisation fiables, mais aussi de lancer des simulations, d'interpréter les résultats et d'améliorer la conception en fonction de ces résultats. En concordance avec les acquis en atelier d'informatique, cette deuxième étape de la formation de

² Cours de traitement de l'enveloppe en Tunisie

la SPE peut porter aussi bien sur la modélisation détaillée que sur la totalité du processus de conception.

3.2 Méthodes pédagogiques existantes

Étant un enseignement relativement récent dans la formation des étudiants en architecture, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'introduction de la SPE dans la formation en vue de proposer des méthodes pédagogiques adaptées et réutilisables. Parmi ces méthodes on citera principalement celles basées sur la compétitivité, celles favorisant la mise en situation réelle et celles s'intéressant au contrôle.

3.2.1 Méthodes basées sur la compétitivité

Les méthodes basées sur la compétitivité cherchent à inciter les étudiants à améliorer et à optimiser des solutions de conception suivant des méthodes qui renforcent la curiosité, la fantaisie et l'envie de gagner. Ces méthodes diffèrent selon le niveau de maîtrise des étudiants. Dans la méthode basée sur la compétitivité qui s'adresse aux débutants, proposée par Zweifel [21], l'enseignant fournit aux étudiants un bâtiment modélisé dont un certain nombre de paramètres n'ont pas été optimisés. Les étudiants doivent ainsi identifier et optimiser ces paramètres en choisissant les scénarios d'optimisation. L'exercice se déroule sous forme de concours, où le premier groupe (ayant eu la plus faible consommation énergétique) remporte un prix (ex. un cadeau ou une attestation fournie par l'enseignant). Cette méthode se concentre sur les compétences de simulation puisque les étudiants disposent d'un modèle prêt et fonctionnel dès le début de la formation. Reinhart [13] suggère une autre méthode qui s'adresse également aux débutants et qui se concentre sur la façon d'informer le modèle. Dans cette méthode, une large gamme de solutions de conception et d'optimisation est donnée par l'enseignant. Le rôle des étudiants ici est de choisir et de modéliser la solution de conception, puis d'informer le modèle avec la solution d'optimisation choisie. Pour renforcer la compétitivité, les groupes d'étudiants ayant obtenu la consommation énergétique la plus basse avec des coûts acceptables reçoivent des crédits supplémentaires à l'examen. Comparée à la première, cette méthode est plus globale. Elle s'étale sur toute l'activité de conception-simulation. Elle écarte toutefois la prédiction des scénarios d'optimisation, puisque ceux-ci sont fournis par l'enseignant.

3.2.2 Méthodes de mise en situation réelle

La mise en situation réelle est une méthode très stimulante pour les étudiants. L'une de ces méthodes met en place une interaction avec des experts de la SPE issus du monde professionnel [6]. Ces experts interviennent comme consultants d'une manière ponctuelle et répétitive pour fournir aux étudiants des conseils spécifiques sur l'optimisation de la performance. Cette méthode propose une aide aux étudiants dans le choix des solutions d'optimisation ce qui nécessite, dans la majorité des cas, énormément de temps et d'interventions afin de combiner plusieurs solutions. Une autre méthode de mise en situation réelle se concrétise par le lancement d'un concours ouvert à la fois aux participants du milieu universitaire et professionnel, avec pour objectif de réaliser les solutions du lauréat. Cette méthode proposée par Togashi [15] encourage les étudiants par la valorisation de leurs travaux. Une telle méthode requiert un niveau de maîtrise élevé et ne peut pas être envisagée comme paradigme pour notre enseignement.

3.2.3 Méthode de contrôle

La première méthode de contrôle de l'apprentissage dans l'enseignement de la SPE a été proposée par Gentile [9], puis adoptée et approfondie ensuite par Tomaszewska [16]. Il s'agit d'une approche dédiée aux débutants, où les scénarios d'optimisation sont fournis aux

étudiants accompagnés des résultats de simulation correspondants. De ce fait, en cas de différences des résultats, l'étudiant peut savoir s'il s'agit d'une erreur ou d'un écart engendré par les calculs sous-jacents. Quand il s'agit d'une erreur, l'étudiant peut facilement la détecter et vérifier en détail où elle a été commise. Cette méthode permet à l'étudiant d'apprendre étape par étape, à être plus autonome et à apprendre de ses erreurs. Elle correspond bien au paradigme que nous souhaitons mettre en place dans notre enseignement, et plus particulièrement en cycle licence où l'étudiant est un « consommateur ».

4 Proposition d'une nouvelle approche d'optimisation

4.1 Définition des indicateurs de performance

Pour envisager la simulation de la performance énergétique du bâtiment dans les premières phases de conception, plusieurs indicateurs de performance doivent être identifiés et sélectionnés. Ces indicateurs peuvent être regroupés en deux principaux types, à savoir : les indicateurs contextuels et les indicateurs conceptuels.

4.1.1 Les indicateurs contextuels

Il s'agit des informations qui sont en rapport avec le contexte du projet (des données) et qui représentent les indicateurs clés sur lesquels repose le travail de simulation, en autres :

Les indicateurs règlementaires : concernent le règlement thermique en vigueur (ex. label thermique, le besoin du confort énergétique en hiver et en été, etc., résistance thermique minimale des matériaux, etc.),

- Les indicateurs environnementaux : incluent la géolocalisation du projet, les données météorologiques, son géoréférencement (orientation et coordonnées) et les informations concernant l'environnement immédiat (masses des constructions voisines, végétation existante, etc.).
- Les indicateurs économiques : comme le budget, les ressources énergétiques (électrique, gaz, photovoltaïque) et les ressources en matériaux.
- L'objectif d'optimisation qui est défini conjointement par le maître d'ouvrage et les concepteurs.

Les indicateurs de base sont définis durant la phase de préconception et sont à prendre en compte durant le processus de conception.

4.1.2 Les indicateurs conceptuels

Ces indicateurs relèvent des choix des concepteurs. Ils dépendent de la phase de conception en question (figure 2) et peuvent être classés comme suit :

- Les indicateurs formels : durant la phase conceptuelle (APS), le projet est modélisé d'une manière volumétrique. Ainsi pour lancer une simulation énergétique, il est nécessaire d'ajouter à la volumétrie du projet une prédéfinition de la zone du périmètre³, de sa profondeur et de ses divisions, du pourcentage d'ouverture de l'enveloppe, de la hauteur moyenne des ouvertures, de la profondeur des brises solaires, le cas échéant. Après la phase conceptuelle, le projet est modélisé avec les éléments de construction et comporte par conséquent toutes ces informations.
- Les indicateurs fonctionnels : au début de la conception (APS), la simulation énergétique est faite d'une manière estimative. À ce stade, il s'agit d'un ensemble d'indicateurs fonctionnels globaux concernant le type du projet à construire (ex. habitation, administration, commerce), ses paramètres énergétiques (ex. taux d'occupation par

³ La zone du périmètre indique les volumes qui sont en contact direct avec l'extérieur.

personne, plages horaires d’occupation, d’éclairage, de conditionnement, etc.) et son planning opérationnel global (ex. nombre de jours par semaine et nombre d’heures par jour, etc.). Durant les phases APD et EXE, les indicateurs fonctionnels sont spécifiés par espace, incluant un paramétrage énergétique précis (ex. surface par personne, densité de la charge d’éclairage, etc.).

Les indicateurs constructifs : décrivent les types d’éléments de construction envisagés et les propriétés thermiques des matériaux associés. Durant la phase APS, ces indicateurs sont prédéfinis d’une manière globale (sur l’ensemble du projet), à partir de bases de données disponibles à l’échelle de la masse (indicateurs constructifs globaux) (ex. caractéristiques thermiques des murs extérieurs et des toitures). Durant la phase APD, ces indicateurs sont également définis à partir de base de données, mais sont plus spécifiques étant associés aux éléments de construction génériques utilisés dans le modèle. Dans la phase EXE, ils sont remplacés par les propriétés des éléments de constructions détaillés du modèle (matériaux des couches constitutives).

Les indicateurs d’équipement CVC : durant la phase APS, ces indicateurs peuvent être prédéfinis d’une manière globale sur l’ensemble de la masse (indicateurs d’équipement CVC globaux) (types des systèmes de refroidissement, de chauffage, etc.) et d’une manière spécifique durant la phase APD (indicateurs d’équipement CVC spécifiques). Dans la phase d’exécution, ces indicateurs sont remplacés par les équipements personnalisés utilisés dans le modèle détaillé.

Les indicateurs conceptuels sont indispensables à la simulation énergétique et doivent être informés avant le lancement de la simulation pour avoir des résultats d’évaluation exhaustifs. Pour des fins de comparaison entre différents scénarios d’optimisations de performance énergétique, certains indicateurs peuvent être remplis à titre indicatif.

4.2 Définition des rôles des intervenants

Réussir l’optimisation énergétique implique l’engagement soutenu de différents intervenants tout au long du projet de bâtiment [8], entre autres, le maître d’ouvrage, l’agence de maîtrise de l’énergie, la collectivité locale, les concepteurs et le bureau de contrôle. L’engagement du Maître d’ouvrage est important durant la phase de préconception pour le choix de l’objectif d’optimisation. L’implication des concepteurs entre architecte et ingénieur-conseil fluides est primordiale tout au long du processus de conception pour la définition de la stratégie de conception architecturale et des équipements CVC à utiliser.

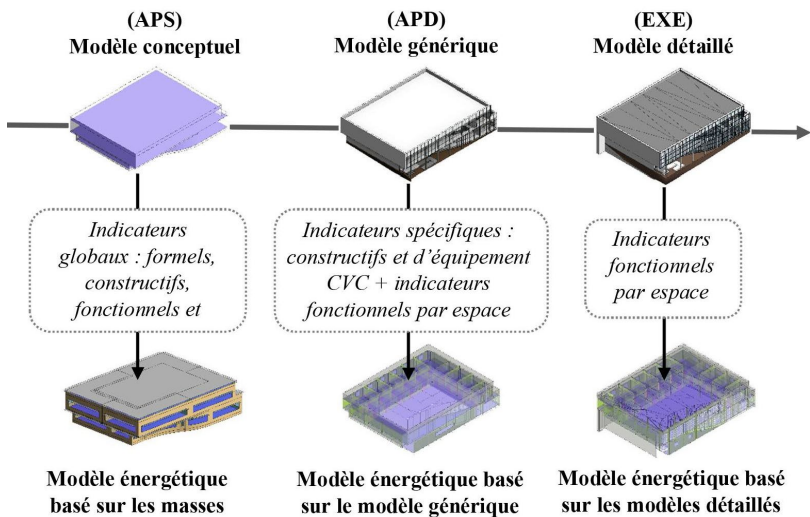


Fig. 2. Indicateurs conceptuels nécessaires selon le niveau de détail du modèle.

4.3 Approche d'optimisation mise en place

L'approche proposée (Figure 3) accompagne le concepteur tout au long du processus créatif, allant de la préconception jusqu'à la phase d'exécution. Il s'agit d'une activité de modélisation ponctuée par des tâches itératives de simulation et d'optimisation, dont les méthodes et les indicateurs diffèrent selon le niveau détail du modèle créé.

4.3.1 Préconception

Durant la phase de préconception, les indicateurs contextuels sont définis avec l'intervention de différents acteurs, dont le maître d'ouvrage, l'architecte, l'ingénieur fluides, etc. Une fois définis et l'objectif d'optimisation spécifié, l'architecte passe à l'intégration de ces indicateurs dans son outil de modélisation avant de réaliser la modélisation conceptuelle (APS).

4.3.2 Modélisation conceptuelle et simulation basée sur les masses

Il s'agit d'une phase de recherche volumétrique basée sur la performance énergétique. Pour simuler la performance de son volume conceptuel, l'architecte commence par le pré-paramétrage des indicateurs formels (ex. pourcentage d'ouverture, hauteur moyenne des ouvertures, pourcentage d'ouverture zénithale) et des indicateurs fonctionnels globaux (ex. type du projet, planning opérationnel global). Puis, il passe à la prédéfinition des indicateurs d'équipement globaux (solution globale du système CVC), avant de créer le modèle énergétique basé sur les masses. Une fois le modèle énergétique créé, l'architecte passe à la simulation à travers un moteur de calcul énergétique basé sur Cloud⁴. Cette méthode de simulation permet à l'architecte d'avoir une estimation préliminaire de la consommation énergétique de son volume conceptuel. Elle lui offre également des scénarios d'optimisation paramétrables lui permettant de passer ainsi à l'optimisation de sa conception en choisissant un ou des scénarios d'optimisation à appliquer. Ces scénarios peuvent concerner l'optimisation de l'orientation du projet. Dans ce cas, le concepteur revient vers l'étape de modélisation pour revoir la forme de son volume conceptuel et simuler de nouveau. Ils peuvent également concerner les indicateurs formels et fonctionnels globaux. Dans ce cas, le concepteur revient à cette étape pour réajuster le paramétrage et simuler la performance de nouveau. Ce processus itératif de modélisation-simulation avec proposition de scénarios d'optimisation correspond parfaitement à notre paradigme d'enseignement, le « Consommateur ». En appliquant le dernier scénario d'optimisation adopté sur son modèle, le concepteur arrive à la fin de ce flux de travail et passe à la préparation des livrables, à savoir, le rendu architectural accompagné d'un rapport comportant le bilan énergétique.

4.3.3 Modélisation générique et simulation basée sur les espaces

Dans la phase de modélisation générique (APD), l'architecte avance dans la conception et transforme le modèle conceptuel (volumétrique) en modèle générique constitué d'éléments de construction (ex. murs, dalles, toits, portes, fenêtres, etc.) et d'espaces. Pour lancer la simulation, il commence par la création du modèle énergétique basé sur le modèle générique, puis passe au pré-paramétrage des indicateurs constructifs spécifiques et des indicateurs fonctionnels par espace (ex. taux d'occupation par personne, plages horaires d'occupation, d'éclairage, de conditionnement, etc.). A ce stade, et contrairement à la phase conceptuelle, l'intervention de l'ingénieur fluides est nécessaire pour la prédéfinition des indicateurs d'équipement générique, après laquelle l'architecte peut lancer la simulation énergétique détaillée. Ce flux de simulation se fait totalement sur le logiciel de modélisation, à travers un moteur de calcul énergétique intégré⁵ à l'outil de modélisation. Il permet d'avoir un bilan

⁴ <https://www.autodesk.com/products/insight/overview#what-is-insight>

⁵ Le calcul se fait toujours sur Cloud avec EnergyPlus.

énergétique détaillé et correspond au paradigme « Interprète » pour pouvoir détecter les indicateurs conceptuels à optimiser et pour prédire des scénarios d’optimisation fiables. Après avoir terminé ce flux de travail de modélisation – simulation et avant de passer à la préparation des livrables, une simulation de l’éclairage naturel est nécessaire pour valider les choix d’ouvertures adoptés. Cette simulation peut se faire également en interne dans le logiciel de modélisation.

4.3.4 Modélisation détaillée et simulation basée sur les modèles détaillés

Bien qu’il s’agisse de la même méthode de simulation que la phase APD, le flux de travail de modélisation – simulation durant la phase de modélisation détaillée (EXE) est plus simple. Les modèles architecture et CVC sont modélisés en détail et comportent toutes les informations nécessaires au travail de simulation. Durant cette phase, le pré-paramétrage concerne uniquement les indicateurs fonctionnels par espace, avant de passer à la création du modèle énergétique basé sur les modèles détaillés. A ce stade, la simulation prend en compte les caractéristiques thermiques de chaque élément du modèle et permet d’avoir un bilan énergétique personnalisé. La simulation de l’éclairage naturel est également nécessaire à cette phase pour pouvoir valider les choix adoptés et passer à la préparation du rapport énergétique final.

Les expériences pédagogiques que nous présentons dans ce qui suit proposent de faire assimiler les étapes des flux de modélisation-simulation proposés, ainsi que les méthodes de simulation adoptées.

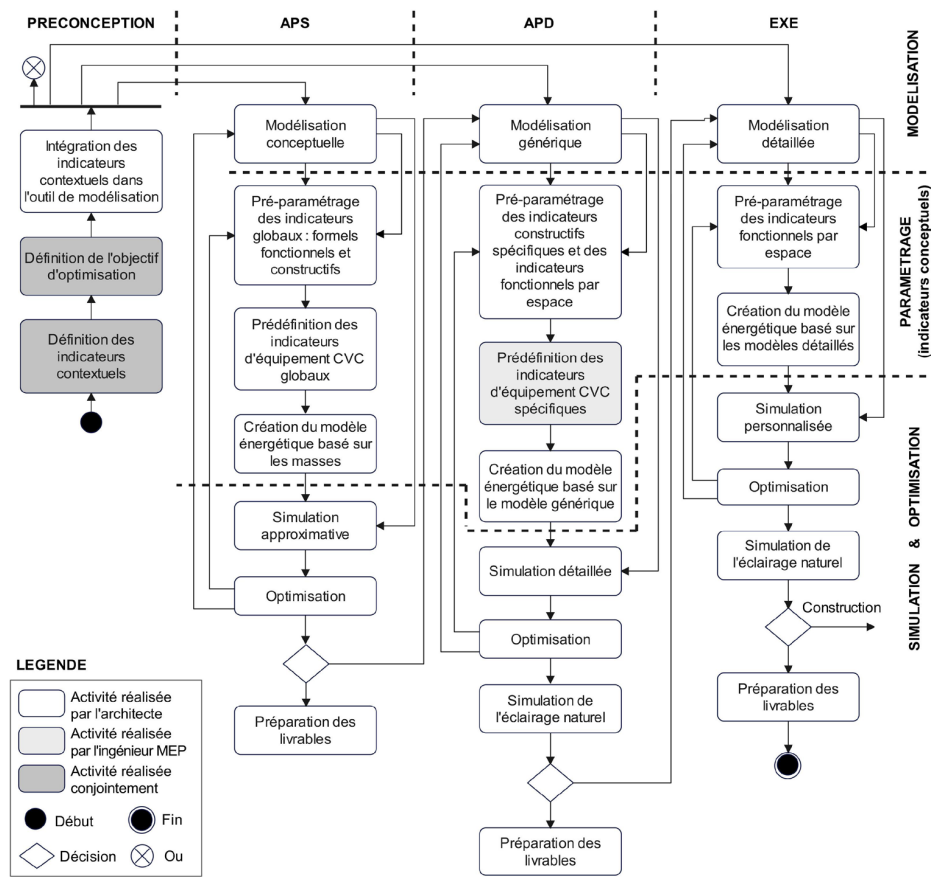


Fig. 3. Approche d'optimisation énergétique proposée pour l'enseignement de la SPE.

5 Expériences pédagogiques

Les expériences pédagogiques que nous avons menées cette année à l'UIK portent sur deux phases de l'approche d'optimisation proposée, à savoir : une première expérience qui porte sur le flux de la phase conceptuelle (APS), effectuée avec les étudiants en 3^{ème} année licence dans le cadre du cours d'informatique appliquée, et une deuxième expérience qui se concentre sur le flux de la phase de modélisation détaillée (EXE), effectuée avec les étudiants en 2^{ème} année master, dans le cadre d'un séminaire qui porte sur l'architecture de la transition numérique.

5.1 Première expérience

L'objectif principal de cette expérience est d'introduire aux étudiants la méthode d'optimisation énergétique en phase conceptuelle et de les initier au flux de travail leur permettant d'aboutir vers des configurations architecturales énergétiquement performantes et optimisées. Le contexte de conception mis en œuvre consiste à modéliser une maison de vacances de 150 m² de surface couverte à Hamamet sur un terrain de 1050 m², avec un objectif d'optimisation de 100 kWh/m²/an. Les retraits et la hauteur totale du bâtiment sont définis par l'enseignant. La démarche prévoit deux étapes, à savoir : une première étape de modélisation de trois différentes solutions de conception volumétrique et la simulation de la performance énergétique de chacune pour en choisir la solution la plus performante. Puis, une deuxième étape d'optimisation de la solution retenue jusqu'à atteindre l'objectif demandé. Étant donné que cette première expérience est menée pendant le cours d'informatique appliquée, les séances prévues à cet effet sont plus orientées vers l'initiation aux outils de simulation et d'optimisation énergétique que vers l'apprentissage de la conception durable. Les étudiants sont ainsi appelés à venir au cours avec leurs trois solutions de conception modélisées lors d'un travail à faire à la maison.

Dans cette expérience, nous nous adressons au paradigme « consommateur », ainsi nous avons opté pour une méthode de contrôle progressive. Cette méthode permet à l'étudiant d'être guidé par une liste de paramètres⁶ énergétiques donnée par l'enseignant (dans un tableau Excel) pour le choix de la solution de conception à maintenir. Dans un second temps, l'étudiant est libre pour le paramétrage énergétique et le choix des scénarios d'optimisation à adopter afin d'améliorer davantage la solution retenue. Cette méthode repose sur la compétitivité, où l'étudiant ayant la consommation énergétique la plus basse avec une conception bien cohérente reçoit un crédit supplémentaire dans l'examen. Durant cette première expérience, le flux de modélisation-simulation a été réalisé en utilisant le logiciel Revit et son extension d'analyse énergétique basée sur Cloud Insight.

5.2 Deuxième expérience

Cette expérience est réalisée suivant le paradigme « Interprète », avec des étudiants qui maîtrisent non seulement les notions fondamentales sur l'énergétique du bâtiment, mais également l'utilisation de l'outil de modélisation à un niveau de détails élevé. Pour compléter cette formation, nous nous sommes concentrés durant cette expérience sur la façon d'informer le modèle détaillé par les propriétés thermiques nécessaires au travail de simulation énergétique. Pour sensibiliser les étudiants à l'importance des indicateurs contextuels de la performance énergétique, notre démarche prévoit deux étapes : une étape de modélisation détaillée d'une maison de maître construite au Québec (projet donné par l'enseignant), à la fin de laquelle l'étudiant est appelé à simuler la performance du projet existant. Ensuite, une deuxième étape de modélisation-optimisation, durant laquelle l'étudiant est appelé à modifier la localisation du projet dans un terrain à Djerba. N'étant plus performant dans un pays chaud, le projet est à réviser suivant un flux de modélisation – simulation afin de diminuer de 30% sa consommation énergétique. Contrairement à la première, cette deuxième expérience vise à initier les étudiants à la conception durable à travers la maîtrise de la modélisation détaillée des éléments de construction. Pour surmonter la contrainte de modélisation détaillée de l'équipement CVC (ce qui ne relève pas des

⁶ Ces paramètres concernent les indicateurs formels, constructifs et fonctionnels globaux du projet.

compétences des étudiants architectes), des indicatifs globaux d'équipement CVC ont été donnés aux étudiants.

Dans cette expérience, la méthode pédagogique est basée sur la motivation, où les étudiants pouvant dépasser le pourcentage de réduction demandé, avec une conception cohérente, reçoivent des crédits dans l'examen (à raison de 1 point pour 5% de plus de réduction). Cette méthode permet de mettre en évidence l'importance de la stratégie de conception (stratégie du froid / du chaud) dans la performance énergétique du projet et incite l'étudiant à essayer plusieurs combinaisons de scénarios d'optimisation pour remédier à cette situation.

6 Résultats, limites et perspectives

La première expérience était très fructueuse, bien qu'il s'agisse d'un nombre limité de solutions de conception demandées. La collecte et l'interprétation des données ont permis de constater que les étudiants ont pu illustrer un gain moyen en consommation énergétique de 17% dans la première étape de l'exercice (choix de la solution à retenir) et de 20% dans la deuxième étape (optimisation de la solution retenue). Ils ont été guidés par le travail de simulation durant la première étape et ont abouti à des projets plus performants à travers le travail d'optimisation, avec un gain total moyen de 37%. Cela met en évidence l'importance de la SPE à un stade précoce du processus de conception et son apport même avec des résultats qui restent approximatifs à ce stade. La méthode de contrôle a facilité l'initiation au paramétrage énergétique et a familiarisé les étudiants au flux de modélisation–simulation en phase conceptuelle.

Il est toutefois à noter que, durant cette expérience, le travail itératif de conception et de simulation n'a pas été appliqué tel que prévu dans l'approche proposée. Ceci est dû au contexte de l'expérience (cours d'informatique) qui ne permet pas de dédier des séances à l'approfondissement des connaissances en matière de durabilité et d'écologie et pour initier effectivement les étudiants à la conception durable. Une future application de cette phase de l'approche sera réalisée en coordination avec l'atelier du projet, afin d'apporter plus d'assistance aux étudiants dans ce processus pour leur permettre de monter en compétence dans la conception durable et de mieux appréhender et tirer profit des différentes étapes de l'approche proposée.

Dans la deuxième expérience, les étudiants ont pu également enregistrer un écart moyen considérable en consommation énergétique (30%). La maîtrise des notions fondamentales de l'énergétique du bâtiment associée au paradigme « Interprète » a permis d'approfondir les connaissances et les compétences des étudiants en matière de conception durable. En effet, les séances allouées à l'encadrement durant la conception, dans le choix des procédés constructifs et des matériaux de construction (ex. recherche des matériaux, vérification des propriétés thermiques de chaque couche, vérification de la résistance thermique totale des éléments, etc.) ont permis aux étudiants d'apprendre de leurs erreurs et d'arriver progressivement à prédire les résultats des scénarios d'optimisation et de réaliser l'incidence sur le coût de la construction. Cette dernière compétence et extrêmement importante dans la formation à la conception durable. Elle sensibilise les futurs concepteurs à l'importance de l'équilibre optimisation / coût et leur permet d'identifier plus rapidement les scénarios les plus performants au moindre coût, selon le contexte spécifique du projet.

La méthode pédagogique basée sur la motivation a créé un esprit compétitif entre les étudiants afin de décrocher le maximum possible de bonus. Ceci les a motivés dans le travail d'optimisation et leur a permis d'aboutir à des projets plus performants. Cependant, certains étudiants ont été emportés par les résultats de simulation et d'optimisation en négligeant parfois l'incidence sur le coût du projet (ex. choix des matériaux d'isolation, du type de vitrage, etc.). Dans ces cas, l'enseignant est intervenu pour rappeler l'importance de

l'équilibre performance / coût recherché et expliquer aux étudiants les limites de la méthode de motivation. Il faut préciser que l'incidence sur le coût de construction a été estimée dans cette expérience d'une manière approximative et que pour avoir une idée plus précise et fiable, il serait important d'engager en parallèle avec la SPE une simulation des coûts afin de comparer les différents scénarios d'optimisation.

Une discussion avec les étudiants des deux expériences a montré leur intérêt pour la méthode de SPE employée. Certains l'ont même appliqué dans leurs exercices en atelier du projet. Toutefois, les étudiants de la deuxième expérience ont trouvé l'étape de révision du modèle selon les scénarios d'optimisations adoptés assez fastidieuse (revoir l'orientation du projet, le pourcentage d'ouverture, les matériaux utilisés, etc.) surtout durant cette phase du processus de conception, quand l'image du projet est déjà définie. C'est à ce moment que l'accent a été mis par l'enseignant sur l'importance de s'engager dans une approche d'optimisation dès les premières ébauches de la conception pour être guidé dans la prise de décision dès le début du projet.

7 Conclusion

Ces expériences pédagogiques ont permis de prendre un certain recul par rapport à l'approche d'optimisation proposée. Même si le flux de travail de la phase de modélisation détaillée n'a pas été appliqué comme prévu, l'expérience demeure pertinente puisqu'elle motive les étudiants en les plaçant dans un flux de travail d'amélioration de la performance qui est approximatif certes, mais qui reste cohérent et compréhensible. Le contrôle de l'incidence des solutions d'optimisation sur les coûts de la construction n'était pas évident. Pour assurer l'équilibre optimisation / coûts, il serait utile d'introduire la simulation des coûts dans les expériences pédagogiques futures. Les retours d'expériences indiqueront si l'approche d'optimisation proposée devrait évoluer pour intégrer une étape de simulation des coûts. Pour mieux sensibiliser les étudiants à l'importance de l'optimisation énergétique à un stade précoce du processus de conception, il serait intéressant d'envisager, dans une expérience pédagogique future, une application qui s'étale sur la totalité de l'approche d'optimisation proposée. De par une meilleure maîtrise du flux de travail d'optimisation relatif à chaque phase, l'étudiant aura une vision plus globale de chacune des méthodes utilisées et sera naturellement orienté vers la SPE durant les premières étapes de la conception.

Enfin, il est important de noter que cet article propose une approche d'optimisation pour l'enseignement de la SPE qui reste encore à évaluer dans sa globalité. Comme toute approche d'optimisation basée sur un travail de modélisation et de simulation, cette approche ne permet pas de trouver la solution de conception la plus performante, mais de simuler et d'optimiser des solutions de conception pour en améliorer la performance suivant des étapes instrumentées et précises.

Références

1. A. Agirbas. Building Energy Performance of Complex Forms-Test simulation of minimal surface-based form optimization. In eCAADe, Berlin, pp. 259-268 (2020)
2. S. Alsaadani, C. Bleil De Souza. Performer, consumer or expert? A critical review of building performance simulation training paradigms for building design decision-making. *J. Build. Perform. Simul.*, **12**, 289-307 (2019)
3. N. Amani et A.A. Reza Soroush. Effective energy consumption parameters in residential buildings using Building Information Modeling. *Global Journal of Environmental Science and Management*, **6**(4), 467-480 (2020)

4. I. Beausoleil. Learning the fundamentals of building performance simulation through an experiential teaching approach. *J. Build. Perform. Simul.*, **12**(3), 308-325 (2019)
5. L. Bragança, S.M. Vieira et J.B. Andrade. Early stage design decisions: the way to achieve sustainable buildings at lower costs. *The scientific world journal*, **12** (2014)
6. P.P. Charles et C.R. Thomas. Four approaches to teaching with building performance simulation tools in undergraduate architecture and engineering education. *J. Build. Perform. Simul.*, **2**, 95–114 (2009)
7. M. Fernandez, J. del-Río, F. del Ama et A. Gonzalez. The relationship between the use of building performance simulation tools by recent graduate architects and the deficiencies in architectural education. *Energies*, **13**(5), 1134 (2020)
8. D. Forgues, D. Monfét et S. Gagnon. Guide de conception d'un bâtiment performant : L'optimisation énergétique avec la modélisation des données du bâtiment (BIM). Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec (2016)
9. N. Gentile, J. Kanter et H Davidsson. A method to introduce building performance simulation to beginners. *Energies*, **13**(8) (2020)
10. N. Gentile, J. Kanter et H. Davidsson. Teaching Building Performance Simulations to students with a diverse background by using a Control Method. In *Conference of International Build. Perform. Simul. Association*, Rome, pp. 1579–1586 (2019)
11. K. Konis, A. Gamas et K. Kensek. Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. *Solar Energy*, **125**, 161-179 (2016)
12. A. Mahdavi. In the matter of simulation and buildings: Some critical reflections. *J. Build. Perform. Simul.*, **13**, 26–33 (2020)
13. C.F. Reinhart, T. Dogan, D. Ibarra et H.W. Samuelson. Learning by playing—teaching energy simulation as a game. *J. Build. Perform. Simul.*, **5**(6), 359-368 (2012)
14. A.S. Shivsharan, D.R. Vaidya et R.D. Shinde. 3D Modeling and energy analysis of a residential building using BIM tools. *Int. Res. J. Eng. Tech*, **4**(7), 629-636 (2017)
15. E. Togashi, M. Miyata, Mn Y. Yamamoto. The first world championship in cybernetic building optimization. *J. Build. Perform. Simul.*, **13**, 391–408 (2020)
16. D. Tomaszewska, R. Lindberg, V. Pasiskevicius, F. Laurell et G. Sobon. Teaching Building Performance Simulations to students with a diverse background by using a Control Method. In *Conference on Lasers and Electro-Optics*, IEEE (2021)
17. L. Wäppling. Multi-Objective Building Performance Simulation-Integrating Building Performance with Architectural Modelling in Early Stage Design. Thesis, Chalmers university of technology, **90** (2019)
18. L. Wang, W. Chen, P. Janssen et G. Ji. Algorithmic generation of architectural Massing Models for building design optimisation-Parametric Modelling Using Subtractive and Additive Form Generation Principles. *Proceedings of the 25th CAADRIA Conference*, Bangkok, pp. 385-3 (2020)
19. D.H. Wolpert, W.G. Macready. No free lunch theorems for optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, **1**, 67–82 (1997)
20. A. Wood. Sustainability: A new high-rise vernacular? *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, **16**, 401–4 (2007)
21. G. Zweifel. Teaching Building Simulation to HVAC Engineering Bachelor Students. In *Proceedings of the 15th IBPSA Conference*, San Francisco, Etats-Unis, pp. 1926–1933 (2017)