


# Gestion autonome d'énergie dans des quartiers « intelligents »

**Jacques Malenfant**  
professeur des universités

© 2021. Ce travail est partagé sous licence CC BY-NC-ND. 

version 1.0 du 22/09/2021

## Résumé

L'objectif de ce projet est de comprendre l'utilisation des concepts, des approches et des techniques du génie logiciel et du développement des systèmes de contrôle cyber-physiques et des systèmes autonomes. Cet objectif sera poursuivi par la réalisation d'une application visant à gérer automatiquement la production et la consommation d'énergie électrique d'une maison dotée d'équipements intelligents (appareils électriques, capteurs, panneaux solaires, éoliennes, batteries de stockage, ...). Ce projet se place dans le contexte futur du passage à des grilles d'énergie utilisant essentiellement des énergies renouvelables.

## 1 Problématique générale

Face à la pollution, aux changements climatiques et aux dangers non encore maîtrisés de l'énergie nucléaire (déchets, accidents, impact environnemental, ...), l'Union européenne ainsi que de nombreux autres pays dans le monde ont engagé une double conversion de leurs réseaux de production et distribution d'électricité. Il s'agit :

- de réduire progressivement la part d'électricité produite par des grands équipements polluants (centrales au pétrole, au charbon ou au gaz, centrales nucléaires, ...) pour les remplacer par des unités de production fonctionnant à partir d'énergies renouvelables (soleil, vent, rivières, marée, ...);
- de rendre « intelligents » les équipements du réseau de production et distribution puis de les relier par réseau informatique de manière à contrôler de manière beaucoup plus fine, précise et réactive l'équilibre entre production et consommation d'énergie.

Ces changements permettent de parler d'un passage aux *grilles d'énergie* dont le fonctionnement sera bien différent des réseaux de production et distribution d'aujourd'hui. En effet, un réseau électrique doit absolument éviter la surcharge et donc maintenir un niveau de production supérieur à la consommation. Or, la production d'électricité via les énergies renouvelables est bien plus fluctuante et répartie sur le réseau que celle via les énergies fossiles ou nucléaires. Aujourd'hui, la production est très centralisée et les décisions pour ajouter (démarrage d'une centrale au gaz par exemple) ou retirer de la production se font sur des prévisions à plusieurs heures correspondant aux délais de mise en route de tels équipements (facilement entre 8 et 24 heures pour des centrales au gaz, par exemple). Ces décisions prises très en amont rendent la fluctuation dans la production invisible et pratiquement sans conséquence pour le consommateur.

Dans le cas des énergies renouvelables, des fluctuations importantes peuvent apparaître à des échelles de temps de quelques minutes (vent fluctuant, temps partiellement nuageux, etc.). Pour palier ces variations plus fortes et plus rapides dans la production, les grilles d'énergie prévoient que les consommateurs jouent un rôle central dans le maintien de l'équilibre entre production et consommation. Les trois principaux moyens envisagés côté consommateur pour assurer l'équilibre lorsque la consommation dépasse la production sont :

1. Repousser certaines consommations à plus tard (resp. les avancer), par exemple en empêchant un appareil (chauffage, réfrigérateur, chauffe-eau, ...) de démarrer si la production est insuffisante, ou en reportant (resp. avançant) le démarrage d'appareils comme le lave-linge ou le four, surtout s'ils sont préprogrammés.
2. Utiliser des ressources locales, soit des unités de production (éoliennes, panneaux solaires, ...), soit des unités de stockage (batteries fixes du logement, batterie d'un véhicule électrique, ...) pour compenser partiellement et/ou temporairement une production insuffisante du réseau.
3. L'échange d'énergie directement entre consommateurs, certains possédant des unités de production dont il peuvent céder une partie de la production temporairement.

Bien sûr, il n'est pas réellement envisageable que les consommateurs eux-mêmes prennent des décisions manuellement à la journée longue, y compris la nuit, pour gérer leur consommation et leur potentielle production. L'automatisation de ces fonctions sera la clé d'une mise en œuvre réaliste de cette vision du futur. Une solution possible serait de confier à l'opérateur du réseau de distribution le soin de contrôler les appareils de nos logements via des compteurs « intelligents ». Une alternative consiste plutôt à doter chaque logement d'un contrôleur local, indépendant du compteur électrique, mais capable de « dialoguer » avec le réseau de distribution, de prendre puis d'appliquer des décisions au nom du consommateur à partir de règles de gestion décidées par ce dernier de manière opaque au réseau (pour protéger les données personnelles des consommateurs). Notons dans les deux cas que la coopération des équipements est nécessaire, d'où la nécessité d'évoluer vers des équipements « intelligents » connectés souvent inclus dans ce que l'on désigne par « internet des objets ».

## 2 Gestion d'énergie intelligente

**Mise en garde préalable :** L'objectif du projet n'est pas le réalisme absolu dans la matérialisation des phénomènes cyber-physiques (consommation électrique, évolution de température, etc.) ou des contrôles exercés. Il s'agit simplement de comprendre globalement ces phénomènes et leurs implications. Par contre, une attention importante sera accordée à la bonne conception des composants et de l'architecture logicielle et à la qualité du développement, comme il se doit dans la spécialité STL.

### 2.1 Équipements intelligents

Pour arriver à automatiser la gestion d'énergie d'un logement, il faudra des équipements électriques se prêtant à un contrôle à distance via réseau. Il serait possible de se contenter d'équiper le réseau électrique interne du logement de prises contrôlables à distance (permettant de couper le courant à l'équipement qui y est connecté), mais cela ne donnerait qu'un contrôle très grossier. Un appareil de chauffage par exemple pourrait offrir un contrôle beaucoup plus fin de sa consommation (en jouant sur la puissance) que simplement être allumé ou forcé à être éteint en lui coupant le courant par la prise à laquelle il est connecté.

Dans l'esprit de l'internet des objets, projetons-nous plutôt dans un avenir pas si lointain où les équipements seront contrôlables à distance par réseau et ce, en offrant une interface permettant de récupérer des informations sur ses fonctionnalités, sur son état courant ainsi que des opérations permettant de modifier son mode et ses paramètres de fonctionnement. Par exemple, un réfrigérateur devrait pouvoir annoncer qu'il possède deux compartiments (froid et congélation), que chacun a une température cible pilotable à distance (généralement 4° pour la partie froid et -18° pour la partie congélation) ainsi que deux températures internes courantes pouvant être lues à distance et un ou deux compresseurs pouvant être mis en attente individuellement.

Pour les besoins de la gestion de l'énergie au niveau d'un logement (maison) voire d'un quartier, les appareils électriques peuvent être classés dans trois catégories :

- les appareils à consommation aujourd'hui *incontrôlable* (sèche-cheveux, ventilateur, ...), qui le resteront vraisemblablement vu leur faible coût, dont on ne peut que subir les effets ;
- les appareils à consommation *suspensible* (réfrigérateur, chauffe-eau, ...) qui sont souvent en opération permanente mais à consommation intermittente pouvant être suspendue pour

- un temps plus ou moins long selon les conséquences (prévisibles) de cette suspension ;
- les appareils à consommation *planifiable* (lave-linge, four, rechargement de batteries, ...) dont il est possible de planifier les utilisations et de modifier le plan pour avancer ou retarder leur démarrage selon la disponibilité de l'énergie en tenant compte éventuellement de contraintes spécifiées par l'utilisateur (le plat dans le four doit être prêt pour 20h00 ou la batterie de la voiture doit être rechargée au moins à 50% pour 8h00 au plus tard, par exemple) ou dictées par les règles de sécurité (la température dans le réfrigérateur ne doit pas monter au-dessus de 8°, par exemple).

De manière similaire, les unités locales de production d'énergie peuvent être classés dans deux catégories :

- les unités de production *aléatoires* (panneaux solaires, éoliennes, ...) à capacité de production plus ou moins limitée mais surtout dont on subit les niveaux de production en fonction des aléas de l'environnement (ensoleillement, vent, ...), offrant des possibilités d'intervenir uniquement pour des raisons de sécurité ou d'entretien (arrêt des éoliennes pour leur mise en sécurité lorsque le vent est trop fort, par exemple) ;
- les unités de production *intermittentes* (mini-barrage hydro-électrique à réservoir, génératrices à essence ou à gaz) qui ne produisent pas en permanence mais qui peuvent « à coup sûr » (sauf pannes, ce qu'on va exclure) produire une quantité d'énergie contrôlable pour une durée maximale prévisible (par exemple, selon le niveau du réservoir d'eau ou des réservoirs de gaz ou d'essence).

Enfin, les unités de stockage (batteries, qu'elles soient fixes dans le logement ou mobiles pour celles de la voiture électrique) se distinguent par deux vues complémentaires : une vue « décharge », qui se comporte comme une unité de production intermittente (selon le niveau d'énergie restant dans les batteries), et une vue « charge » qui se comporte comme un appareil suspensible voire planifiable consommant de l'énergie.

Dans le cadre du projet, vous devrez inclure ***au moins un appareil*** et ***au moins une unité de production de chacun des types précédents*** ainsi qu'***au moins une unité de stockage***.<sup>1</sup> De plus, il sera nécessaire de pouvoir obtenir le niveau de consommation d'énergie instantanée totale du logement. Pour plus de réalisme, cela sera assuré par le compteur électrique supposé aussi intelligent et connecté dont il faudra inclure une version simplifiée aux seuls besoins utiles au projet (à l'étape 2, il servira à mesurer l'énergie instantanée consommée en watts mais pas le cumul de consommation en kwh utilisé pour la facturation, par exemple).

## 2.2 Gestion de l'énergie et contrôle

Si nous pouvions déployer une telle application dans une maison ou un logement réels, nous pourrions connaître la consommation électrique des différents appareils en plaçant des capteurs de mesure sur le réseau ou grâce à des capteurs intégrés aux appareils et interrogeables à distance. Malheureusement, nous ne disposons pas d'une plate-forme expérimentale pour cela, et ce serait de toutes façons un effort trop important dans le cadre d'un cours de 6 ECTS.

Pour nous permettre de développer quand même un logiciel réaliste, nous allons nous tourner vers la simulation. Chaque appareil, chaque unité de production et chaque unité de stockage devra être à même de simuler sa consommation ou sa production électrique instantanée (en ampères ou en watts). Pour les appareils simples, il suffit souvent d'avoir une consommation constante : soit l'appareil est allumé et il consomme une quantité d'électricité fixe (par exemple, un sèche-cheveux consommant 1200 watts), soit il est éteint et il ne consomme bien sûr rien. Un cas à peine plus complexe est un appareil qui a différents modes de fonctionnement (par exemple, le sèche-cheveux à deux niveaux de puissance). Dans ces cas, le simulateur produira une consommation électrique constante par morceaux et le basculement entre les niveaux se fera par des événements : allumage, extinction, passage de bas à haut et vice versa, etc. L'application pourra alors « connaître » le niveau de consommation ou de production d'électricité en implantant les capteurs de telle manière à aller chercher la valeur dans les simulateurs, selon la technique de simulation « *software-in-the-*

1. Tout au long du projet, des exemples vous seront fournis pour vous aider à mieux comprendre ce qu'il faut faire et ce qui est attendu. Dès le départ, vous aurez donc des exemples d'appareils et un début de programmation du projet. Vous pourrez inclure ces éléments fournis dans votre projet, mais les éléments demandés ici *s'ajoutent* aux éléments fournis que vous choisirez d'inclure dans votre projet.

*loop* » vue en cours.

D'autres appareils, plus complexes, passent d'un mode à l'autre de manière autonome. Par exemple, un appareil de chauffage à thermostat est réglé pour une certaine température cible. Il bascule d'allumé à éteint lorsque la température cible est atteinte, puis d'éteint à allumé quand la température repasse sous la température cible. Ces changements de mode peuvent se produire à cause d'une limite physique (par exemple, le niveau d'eau du réservoir d'un barrage hydro-électrique est limité car le réservoir débordera si le niveau d'eau dépasse la hauteur du barrage), mais dans notre application, ils se produiront le plus souvent suite à un contrôle, comme la détection de l'atteinte de la température cible pour le chauffage. Dans le projet, différentes techniques de contrôle pourront être utilisées. Certains appareils de tous les jours ont une fonction de contrôle simple *intégrée* à l'appareil lui-même :

- Chauffage : à partir d'une température cible et d'une lecture de la température ambiante, le thermostat de l'appareil l'allume et l'éteint de telle manière à maintenir la température ambiante proche de la température cible.
- Chauffe-eau : de manière similaire à celle d'un appareil de chauffage, le chauffe-eau maintient une température cible de l'eau dans son réservoir en agissant sur des éléments de chauffage électrique placés dans le réservoir.
- Four : similaire au chauffe-eau, avec éventuellement une minuterie qui arrête la cuisson au bout d'un temps déterminé par l'utilisateur.
- Réfrigérateur : il agit de même pour maintenir la température cible de ses compartiments, à ceci près qu'il utilise un compresseur pour refroidir et non des éléments de chauffage pour augmenter la température ; un réfrigérateur à un compresseur refroidit ses deux compartiments (s'il y en a deux) en même temps alors qu'avec deux compresseurs, les deux compartiments sont gérés indépendamment.

Pour ces contrôleurs, le plus simple sera d'utiliser des formes de contrôle basiques venant de l'automatique comme les contrôleurs à seuils avec *hystérésis*, mais il vous sera possible d'utiliser des contrôleurs plus complexes si vous le souhaitez.

Ensuite, le contrôleur de gestion d'énergie du logement va exercer aussi une forme de contrôle en collectant des données sur l'état actuel de la consommation et des appareils, en conservant une liste des demandes de consommation (lave-linge ou four à démarrer) ou des appareils dont la consommation a été suspendue (réfrigérateur, chauffe-eau, chauffage, ...) pour décider selon la demande et la production courantes les actions de gestion d'énergie appropriées. Ce type de contrôle pourra utiliser les techniques présentées en cours dans le contexte de l'informatique autonome ou de la robotique autonome.

## 2.3 Influence de l'environnement

L'environnement désigne ici tous les facteurs extérieurs influençant la gestion d'énergie en dehors des équipements (hormis les actions des utilisateurs). Par exemple, on pourra intégrer :

- l'intensité d'ensoleillement courant qui influe sur le niveau de production des panneaux solaires ;
- la force du vent qui influe sur le niveau de production des éoliennes ;
- la température extérieure qui influence via la porosité thermique des murs du logement la manière dont décroît la température intérieure ;
- la température de l'eau froide provenant du réseau de distribution d'eau qui influe sur la température de l'eau du réservoir d'eau chaude lorsque la consommation d'eau chaude nécessite son remplissage.

Ces éléments entrant en ligne de compte pour la gestion de l'énergie, il faudrait le cas échéant intégrer dans l'architecture logicielle des capteurs connectés permettant de connaître les valeurs courantes de ces facteurs d'environnement (thermomètre extérieur, thermomètre sur le compteur d'eau, anémomètre, ...). Pour être en mesure de mettre au point et de tester systématiquement le système, il faudra donc simuler ces phénomènes pour produire des données d'entrée réalistes pour mettre au point et tester le système de gestion d'énergie.

## 2.4 Impact des utilisateurs

Dans un logement, les activités des utilisateurs sont à l'origine de la demande d'énergie des appareils. Par exemple, les phénomènes suivants pourront être intégrés :

- les choix des températures cibles pour les appareils concernés ;
- les moments et durée de consommation d'eau chaude (aux heures de repas pour laver la vaisselle, matin pour les douches, soir pour les bains, ...) ;
- les accès au réfrigérateur (ouvertures et fermetures des portes) qui influent sur la rapidité de l'augmentation de la température interne des compartiments ;
- demandes planifiées d'utilisation des appareils concernés (four, lave-linge, ...) ;
- allumage et extinction des appareils à consommation incontrôlable.

Encore ici, pour mettre au point et tester le système, il faudra être en mesure de simuler ces comportements, selon les appareils qui seront inclus dans le système.

## 3 Étape 1 — Composants équipements et leur interconnexion

**Nota bene :** À cette étape, nous nous intéressons uniquement à la partie purement logicielle (composants) du projet. Ce n'est qu'à l'étape 2 que nous inclurons l'énergie électrique en termes quantitatifs grâce à la simulation. De même, les divers contrôles ne seront programmés qu'à l'étape 3.

Pour cette première étape, chaque équipement sera représenté par un composant avec (au moins) une interface offerte explicitant les opérations permises. Le compteur électrique et le gestionnaire d'énergie seront également représentés par des composants.<sup>2</sup> Tous les appareils (sauf les incontrôlables), les unités de production et les unités de stockage seront connectés au gestionnaire pour être pilotés à distance par ce dernier. Le rôle du composant représentant le compteur électrique ne sera effectif qu'à l'étape 2 quand des données de consommation d'électricité seront obtenues par la simulation puis surtout à l'étape 3 lorsque les simulateurs seront intégrés aux composants et que les mesures offertes au gestionnaire d'énergie pourront être lues par le composant depuis la simulation.

Une fois sélectionnés les appareils, unités de production et unité de stockage que vous allez inclure dans votre projet, il faudra faire une conception de chacun en déterminant les opérations qui seront disponibles sur ces derniers de manière à spécifier les interfaces qu'ils vont offrir. Vous devrez ensuite implanter les différents composants et un assemblage exécutable. À cette étape, la consommation électrique ne sera pas matérialisée. En effet, la connexion électrique n'est pas de nature informatique ; elle sera simulée par des techniques qui vont être élaborées à la seconde étape du projet puis intégrées aux composants à la troisième étape.

### Connexion des équipements à consommation contrôlable

Dans la description générale en introduction, nous avons passé sous silence la problématique pratique de la connexion (informatique) des équipements avec le gestionnaire d'énergie. Dans une économie de marché libre, il est difficile d'imaginer que tous les équipements électriques proposés par tous les industriels au monde se conforment aux mêmes interfaces, espèce de standard industriel international. Cette difficulté va nous permettre d'explorer les possibilités de la génération de code à l'exécution à l'aide de l'outil Javassist pour les appareils contrôlables.<sup>3</sup>

Dans le cadre du projet nous allons supposer que le gestionnaire d'énergie offre une interface d'enregistrement et connexion pour les équipements contrôlables<sup>4</sup> et requiert des interfaces de contrôle via lesquelles il va piloter les différents types d'équipements.<sup>5</sup> Lors de leur enregistrement,

2. Une version préliminaire de ces composants vous sera fournie.

3. Nous allons nous limiter aux composants représentant des appareils à consommation suspensible et planifiable uniquement. Les appareils incontrôlables ne sont pas connectés au contrôleur de gestion d'énergie, donc leurs composants ne sont pas concernés. Les composants représentant des appareils de production d'énergie seront connectés au contrôleur de gestion d'énergie de manière classique.

4. `fr.sorbonne_u.components.cyphy.hem2021.interfaces.EquipmentRegistrationCI`

5. `fr.sorbonne_u.components.cyphy.hem2021.interfaces.StandardEquipmentControlCI`,  
`fr.sorbonne_u.components.cyphy.hem2021.interfaces.SuspensionEquipmentControlCI`,  
`fr.sorbonne_u.components.cyphy.hem2021.interfaces.PlanningEquipmentControlCI`.

les équipements vont fournir au gestionnaire un document XML disant quelle interface parmi les requises définies par ce dernier permettra de les contrôler puis décrivant la manière de faire le lien entre cette interface et leur propre interface offerte. Ce document XML suit un schéma Relax NG fourni.<sup>6</sup> Ce document permettra de générer à la volée le code de la classe de connecteur à utiliser pour connecter (au sens de BCM) le composant gestionnaire au composant représentant l'appareil qui souhaite s'enregistrer.

Voici en résumé le scénario qui doit être implanté. Tous les appareils connaissent l'URI du port du gestionnaire d'énergie offrant l'interface d'enregistrement. Un appareil s'y connecte (au sens BCM) et appelle la méthode `register`. Cette méthode prend un identifiant unique de l'équipement (son numéro de série, par exemple), l'URI de son port entrant offrant son interface de contrôle et le chemin menant au fichier du document XML décrivant son interface de contrôle. Ce document contient toute l'information nécessaire pour générer le code du connecteur qui va être utilisé pour connecter l'équipement au contrôleur.<sup>7</sup> Le gestionnaire va alors générer dynamiquement la classe de connecteur avec Javassist puis l'utiliser pour se connecter à l'équipement.<sup>8</sup>

## Modalité de réalisation

À titre de suggestion, la réalisation de cette étape peut elle-même se décomposer en tâches :

- identification des équipements à inclure dans votre projet (appareils et unités de production) ;
- recherches personnelles et sur Internet pour trouver des informations réalistes sur les fonctionnalités des équipements sélectionnés pour bien modéliser leurs services ;
- définition des interfaces offertes et requises puis développement des composants (la consommation électrique n'étant pas modélisée à cette étape, contentez-vous de vous assurer que vos appareils passent bien d'un mode à l'autre quand les opérations correspondantes sont appelées et que les opérations permettant de récupérer des données fonctionnent correctement) ;
- programmation du générateur de connecteurs pour les interfaces de contrôle en utilisant l'outil Javassist<sup>9</sup> ;
- assemblage des composants pour former une application exécutable ;
- programmation de scénarios de démonstration en utilisant les méthodes `start` et `execute` des composants.

Pour la génération du code des connecteurs, vous pouvez vous référer à la classe `fr.sorbonne_u.components.cvm.config.ConfigurationFileParser` de BCM pour un exemple de traitement des fichiers XML en Java. Du point de vue développement BCM, il est aussi vivement conseillé de faire toute la mise au point d'abord en exécution mono-JVM et de ne passer à une exécution multi-JVM que pour préparer votre soutenance à mi-semestre.

À l'issue de cette étape, vos réalisations devraient permettre :

- d'expliquer votre conception, les choix que vous aurez faits et l'état d'avancement que vous aurez atteint ;
- d'avoir au moins 5 composants appareils et unités de production (un de chacun des types énumérés ci-haut) ainsi qu'une unité de stockage et des versions simplifiées du compteur et du contrôleur de gestion d'énergie dans un assemblage exécutable ;
- d'exécuter des scénarios de tests d'intégration représentant par exemple une (partie de) journée dans la vie du logement et de pouvoir suivre les changements de mode de fonctionnement ordonnés par le contrôleur ;
- de faire une démonstration à la fois en mono-JVM et en multi-JVM.

---

6. `control-adapter.rnc`

7. Des exemples complets pour deux appareils vous seront fournis.

8. Dans votre développement, il est conseillé de programmer d'abord manuellement les connecteurs de vos appareils et d'utiliser ces connecteurs manuels pour mettre au point votre code. Seulement ensuite, vous vous attaquerez à la génération automatique, pour bien séparer les préoccupations en vous concentrant alors sur la génération de code.

9. Il est conseillé d'abord de programmer manuellement les connecteurs et de mettre au point de votre code avant de remplacer vos connecteurs manuels par des connecteurs générés à la volée via Javassist.



## 4 Étape 2 — Simulation MIL

**Nota bene :** À cette étape, nous nous intéressons uniquement à la simulation de l'énergie électrique, laissant de côté les composants logiciels qui ne seront repris qu'à l'étape 3.

Dans la seconde étape, en se basant sur les connaissances et compétences développées en cours sur la simulation MIL des systèmes cyber-physiques, l'objectif sera d'introduire une première simulation MIL de la consommation d'électricité des appareils choisis à l'étape 1. Par simulation MIL, nous entendons une architecture de simulation contenant uniquement des modèles DEVS. À cette étape, nous nous limitons aussi aux différents modes de fonctionnement des appareils de manière à produire correctement leur consommation/production d'électricité. Les basculements entre modes exigeant une décision (ou un contrôle) ne seront intégrés qu'à l'étape 3. Par contre, ceux dus à l'environnement ou aux utilisateurs seront immédiatement intégrés.<sup>10</sup>

Pour la modélisation de la consommation d'énergie, chaque composant représentant un équipement va être doté d'un simulateur DEVS qui va modéliser et simuler sa consommation en fonction de son mode de fonctionnement, des paramètres de la simulation (par exemple, températures cibles, température extérieure, etc.) et des effets de l'environnement et des utilisateurs (voir ci-haut). Les connaissances et compétences nécessaires pour ce faire sont développées principalement aux cours 3 à 5 (vus avant le début de cette étape 2). À cette étape, on met de côté les contrôles qui ne seront abordés qu'à l'étape 3. En pratique, si un appareil a plusieurs modes de fonctionnement, que ce soit suite à des décisions de l'utilisateur (allumer, éteindre, ...), à des contrôles ou à des effets de l'environnement (variation de la température extérieure, suspension, ...), on se contentera de les modéliser par des événements à traiter par le modèle de consommation d'énergie provoquant les basculements de modes.<sup>11</sup>

### Modalité de réalisation

À titre de suggestion, la réalisation de cette étape peut elle-même se décomposer en tâches :

- recherches personnelles et sur Internet pour trouver des informations réalistes sur les niveaux de consommation ou de production d'énergie des équipements sélectionnés (commencez par choses simples, en prenant un niveau fixe de consommation par mode de fonctionnement puis, quand vos simulateurs fonctionneront bien, vous pourrez développer des modèles plus complexes) ;
- développement des simulateurs de chaque appareil en DEVS à l'aide de la bibliothèque Java fournie avec quelques tests unitaires pour s'assurer de leur bon fonctionnement ;
- développement des modèles de simulation de l'environnement et des actions des utilisateurs ;
- création d'un modèle couplé complet capable de réaliser une simulation de l'ensemble des appareils selon quelques scénarios que vous aurez prévus et programmés.

À l'issue de cette étape, vos réalisations devraient permettre :

- d'expliquer votre conception des simulateurs, les choix que vous aurez faits et l'état d'avancement que vous aurez atteint ;
- de montrer individuellement (sortes de tests unitaires) le comportement simulé des différents appareils avec des scénarios illustrant l'ensemble des fonctionnalités de chacun ;
- de montrer des scénarios de simulation complets (sortes de tests d'intégration) permettant de suivre la consommation d'énergie de chaque appareil et au niveau global via le modèle du compteur électrique (qui fait la somme des consommations).

## 5 Étape 3 — Intégration SIL et contrôle

Dans cette troisième étape, vous allez faire l'intégration des modèles de simulation de l'étape 2 dans les composants développés à l'étape 1 de manière à pouvoir mener une simulation SIL

<sup>10</sup>. Il n'est pas nécessaire de produire des modèles de simulation de l'environnement et des utilisateurs très complexes ; des modèles assez simples suffiront.

<sup>11</sup>. Des exemples vous seront fournis.

(simulation intégrée avec l'exécution du code des composants). Vous allez ensuite développer les contrôles effectués par les appareils et par le gestionnaire d'énergie.

Sur la base de ce que vous aurez réalisé à l'étape 2, l'étape 3 doit d'abord intégrer les simulateurs DEVS aux composants. Les compétences nécessaires sont abordées principalement au cours 8. Un point d'avancement serait alors de réussir à faire s'exécuter les simulations MIL de l'étape précédente mais cette fois-ci à travers les composants.

Ensuite, vous allez développer les contrôles en commençant par les appareils, les unités de production et les unités de stockage. Pour cela, vous allez utiliser les moyens de communication entre modèles DEVS et composants.<sup>12</sup> Par exemple, pour un appareil de chauffage avec thermostat, l'appareil connaissant la température cible devra régulièrement récupérer la température courante et arrêter le chauffage quand la température cible est atteinte. Les connaissances et compétences nécessaires sont développées principalement au cours 6 (vu avant le début de cette étape 3).

Ensuite, vous devrez aborder le contrôle effectué par votre gestionnaire d'énergie. D'abord, vous pourrez implanter un contrôle purement réactif capable de suspendre certains appareils ou reporter les programmes d'autres appareils en fonction de l'énergie disponible. Vous pourrez ensuite intégrer de la planification, à la fois en faisant des prévisions de production et des prévisions de consommation d'énergie. Par exemple, la consommation peut être prévue en intégrant au contrôleur des tâches planifiées comme l'exécution d'un programme (avant une heure de fin limite prédéfinie) qui peuvent être insérées dans les autres actions, par exemple en prévoyant un délai de pause sur un réfrigérateur, un chauffe-eau ou le chauffage du logement. Les connaissances et compétences nécessaires sont développées principalement aux cours 6 et 10 (vus avant la fin de l'étape 3).

## Modalité de réalisation

À titre de suggestion, la réalisation de cette étape peut elle-même se décomposer en tâches :

- intégration des simulateurs développés à l'étape 2 dans composants représentant les appareils développés à l'étape 1 ;
- construction de l'architecture de simulation jointe à l'architecture à base de composants et sa mise au point pour pouvoir exécuter des scénarios de tests d'intégration ;
- validation informelle de cette intégration en faisant s'exécuter les scénarios de simulation de l'étape 2 sur cette architecture combinée simulateurs/composants ;
- fusion de la partie simulateurs et de la partie code des composants de telle manière à ce que le code des composants puissent utiliser les données de consommation d'énergie fournies par la simulation et modifier l'exécution de la simulation en agissant sur les appareils (suspension, report de programmes, etc.) ;
- développement progressif du code du gestionnaire d'énergie.

Pour le développement du gestionnaire d'énergie, vous pourrez utiliser le moteur de règles EasyRules si vous souhaitez aborder cette approche de décision à base de règles qui sera vue au cours 10.

À l'issue de cette étape, vos réalisations devraient permettre :

- d'expliquer l'ensemble de votre conception, des choix que vous aurez faits et l'état final que vous aurez atteint ;
- d'illustrer les contrôles et les fonctions de planification ajoutées à vos appareils et à votre gestionnaire par des scénarios pertinents (il n'est pas nécessaire de produire des scénarios trop complexes ou qui rendent le contrôle impossible, mais suffisants pour démontrer que ce que vous avez implanté fonctionne) ;
- de faire une démonstration en mono-JVM.

## 6 Étape 4 — Coordination entre gestionnaires d'énergie

Cette dernière étape vise à aborder les aspects de coordination des systèmes de contrôle cyber-physiques répartis. L'idée sera d'ajouter la possibilité d'interconnecter des logements entre eux

---

12. Des exemples vous sont fournis.



pour partager la production et le stockage d'énergie. Une interface sera proposée pour ce faire et elle permettra aussi d'établir un lien de fourniture d'énergie d'un compteur à l'autre. Il sera alors possible pour le gestionnaire d'énergie d'un logement de savoir si d'autres gestionnaires qui lui sont reliés disposent de capacités de production ou de stockage disponibles afin de les utiliser à son profit.

Pour cela, il sera mis en place un autre composant permettant la coordination entre les contrôleurs pour réguler ces échanges.<sup>13</sup> Les compétences pour réaliser cette phase du projet seront couvertes principalement au cours 12. Pour passer à l'échelle, des approches couvertes au cours 14 seraient aussi utilisables, mais ce cours interviendra trop tard pour que vous puissiez raisonnablement intégrer ces techniques dans votre rendu final.

## Modalité de réalisation

À titre de suggestion, la réalisation de cette étape peut elle-même se décomposer en tâches :

- concevoir puis les interconnexions entre les compteurs électriques et les gestionnaires de différents logements ;
- assurer la bonne mesure des échanges d'électricité au niveau de la simulation des compteurs électriques ;
- compléter le code des gestionnaires d'énergie pour assurer l'échange d'électricité et les décisions afférentes.

À l'issue de cette étape, vos réalisations devraient permettre :

- d'expliquer l'ensemble de votre conception, des choix que vous aurez faits et l'état final que vous aurez atteint ;
- de montrer les contrôles et les fonctions d'échange et de coordination entre vos gestionnaires d'énergie (il n'est pas nécessaire d'implanter des contrôles et algorithmes de décision trop complexes) ;
- d'illustrer la coordination entre gestionnaires sur des scénarios pertinents (encore ici, il n'est pas nécessaire de produire des scénarios trop complexes ou qui rendent le contrôle impossible, mais suffisants pour démontrer que ce que vous avez intégré fonctionne) ;
- de faire une démonstration à la fois en mono-JVM et en multi-JVM.

## 7 Modalités de remise et d'évaluation des projets :

- Le projet se fait **obligatoirement en équipe de deux étudiants**. Tous les fichiers sources du projet doivent comporter les noms (balise `author`) de tous les auteurs en Javadoc. Lors de sa formation, chaque équipe devra se donner un nom et me le transmettre avec les noms des étudiants la formant au plus tard le **1er octobre 2021 à minuit**.
- Le projet doit être réalisé avec Java SE 8. Attention, peu importe le système d'exploitation sur lequel vous travaillez, il faudra que votre projet s'exécute correctement sous Eclipse en Mac Os X (que j'utilise et sur lequel vous devrez me faire vos soutenances).
- Votre rendu final de projet devra inclure une *documentation Javadoc* des différents paquets de votre projet. La documentation Javadoc sera générée et incluse dans votre livraison dans un répertoire `doc` au même niveau que votre répertoire `src`.
- Votre code final doit aussi être commenté, être lisible et correctement présenté (indentation, choix pertinents des identifiants, ...).
- L'évaluation comportera quatre épreuves<sup>14</sup> : deux audits intermédiaires, une soutenance à mi-semestre accompagnée d'un rendu de code et une soutenance finale accompagnée du rendu final du projet et de la documentation associée. Les deux audits intermédiaires

13. Dans une vision plus complète d'une grille d'énergie, des plates-formes d'échange d'énergie devraient permettre à un consommateur par exemple de proposer ses excédents de production pour les mettre à l'enchère des ses voisins, ces derniers achetant l'énergie à un prix plus ou moins élevés en fonction de leurs besoins immédiats (par exemple, nécessité de recharger complètement les batteries de la voiture électrique pour un long trajet prévu le lendemain). Sans aller aussi loin dans le projet, une plate-forme d'échange simpliste permettant de préfigurer de telles fonctionnalités sera mise en place.

14. En cas de passage à une enseignement complètement en distanciel, les audits pourront être remplacés par des rendez-vous de suivi de projets hebdomadaires par visio-conférences qui seront notés au *pro rata* de leur nombre.

dureront 15 minutes chacun. La soutenance à mi-parcours durera 20 minutes. La soutenance finale durera 30 minutes. Le tout se déroulera selon les modalités suivantes :

1. Les **deux audits intermédiaires** auront lieu pendant les séances du cours, *a priori* le **20 octobre 2021** puis le **5 janvier 2022**. Ils se dérouleront de manière informelle devant votre ordinateur où vous pourrez me présenter l'état d'avancement de votre projet et répondre à mes questions. Ils donneront lieu à une note sur 20 valant chacune 10% de la note finale de l'UE. L'audit 1 visera à vérifier que vous avez atteint les objectifs de l'étape 1 ; elle vous permettra également de poser des questions pour orienter la suite de votre travail. L'audit 2 portera sur l'atteinte des objectifs de l'étape 3 tel que décrits précédemment.
  2. La **soutenance à mi-parcours** portera sur l'atteinte des objectifs des deux premières étapes du projet et elle aura lieu dans la semaine des premiers examens répartis, *a priori* le **24 novembre 2021** ; elle donnera lieu à une note sur 20 comptant pour 30% de la note finale de l'UE. Elle comportera une discussion des réalisations pendant une quinzaine de minutes (devant l'écran sous Eclipse) et une courte démonstration de cinq minutes sur un ordinateur fourni (sous Mac Os X) à partir du rendu du projet. Les rendus à mi-parcours se feront le **dimanche 21 novembre 2021 à minuit** au plus tard.
  3. La **soutenance finale** portant sur l'ensemble du projet mais avec un accent sur les troisième et quatrième étapes aura lieu dans la semaine des seconds examens répartis, *a priori* dans la semaine du **9 février 2022** ; elle donnera lieu à une note sur 20 comptant pour 50% de la note finale de l'UE. Elle comportera une présentation d'une douzaine de minutes (en utilisant des transparents), une discussion d'une dizaine de minutes également devant écran sur les réalisations suivie d'une démonstration sur un ordinateur fourni (sous Mac Os X) à partir du rendu final du projet. Les rendus finaux se feront le **dimanche 6 février 2022 à minuit** au plus tard.
- Bien que les audits et les soutenances se fassent par équipe, l'évaluation reste à chaque fois **individuelle**. Lors des audits et des soutenances, *chaque étudiant* devra se montrer capable d'expliquer différentes parties du projet, et selon la qualité de ses explications et de ses réponses, sa note peut être supérieure, égale ou inférieure à celle de l'autre membre de son équipe.
  - Les audits et les soutenances auront lieu selon un horaire de passage qui sera publié le moment venu sur le site de l'UE. **Tout retard** de l'équipe de plus de dix minutes à ces soutenances entraînera son **annulation** et une note de 0 sera attribuée aux deux membres de l'équipe pour l'épreuve concernée. Si un des membres d'une équipe arrive avec plus de dix minutes de retard, il sera exclu de l'épreuve et une note de 0 lui sera attribuée. Dans ce cas, si l'autre membre de l'équipe est à l'heure, il passera l'épreuve seul.
  - Le rendu à mi-parcours et le rendu final se font sous la forme d'une archive contenant un répertoire directement utilisable sous Eclipse pour créer un nouveau projet. Le répertoire de projet et votre archive **doivent** avoir pour nom celui de votre équipe (ex. : équipe LionDeBelfort, répertoire de projet **LionDeBelfort** et archive **LionDeBelfort.tgz**). Cette archive doit se présenter au format **tgz** si vous travaillez sous Unix ou **zip** si vous travaillez sous Windows et ce **à l'exclusion de tout autre format !** Vous m'enverrez le fichier à **Jacques.Malenfant@lip6.fr** comme attachement fait proprement avec votre programme de gestion de courrier préféré ou encore par téléchargement depuis un site tiers avec un lien envoyé par courrier électronique (en lieu et place du fichier).
  - **Tout manquement à ces règles élémentaires entraînera une pénalité dans la note des épreuves concernées !**
  - Pour l'épreuve de deuxième session, si elle s'avérait nécessaire, elle consiste à poursuivre le développement du projet pour résoudre ses insuffisances constatées à la première session et donnera lieu à un rendu du code puis à une soutenance dont les dates seront déterminées en fonction du calendrier du master. Quand un seul membre de l'équipe doit passer la seconde session, il fait ce travail seul ; l'évaluation tient alors compte du fait que le rendu de seconde session a été fait seul ou à deux.

FIN DU DOCUMENT.