

# Le projet EAST : des environnements d'apprentissage

BERNARD BLANDIN<sup>[1]</sup>

**Le projet EAST<sup>[2]</sup> vise à mettre au point une méthode de développement de scénarios d'apprentissage de concepts, de gestes ou de procédures techniques, greffés sur des environnements industriels en 3D.**

**Les premiers démonstrateurs expérimentés concernent le domaine de l'énergie.**

Depuis plusieurs années, on constate que tout produit industriel existe, avant même d'être réalisé, sous la forme d'une maquette numérique en 3D issue des outils de CAO. Petit à petit, cette pratique s'est généralisée ; elle atteint désormais le secteur du bâtiment et des travaux publics. Aujourd'hui, le patrimoine numérique des entreprises contient une masse considérable d'objets en 3D de toutes sortes et notamment des objets techniques complexes représentés dans leurs moindres détails. De plus, beaucoup de ces objets ayant des cycles de vie courts, la majeure partie du patrimoine numérique des entreprises sera rapidement constitué de maquettes numériques obsolètes ou n'ayant plus d'utilité productive. Les entreprises auraient donc intérêt à valoriser ce patrimoine.

Depuis plusieurs années aussi, le désintérêt des jeunes pour les disciplines et les métiers scientifiques et techniques s'accroît dans la plupart des pays développés, comme le montrent notamment les enquêtes de l'OCDE, alors que, dans le même temps, la demande en compétences dans ces domaines ne cesse de grandir. Cet écart inquiétant amène aujourd'hui l'Europe ou les États-Unis à financer des initiatives permettant d'enrayer, voire de retourner cette tendance. On peut faire l'hypothèse qu'un des moyens de rendre l'étude de ces domaines attractive serait la mise en œuvre de pédagogies différentes, fondées sur des projets et intégrant des outils numériques utilisant les dernières technologies, comme les casques d'immersion virtuelle en 3D à bas prix qui arrivent sur le marché.

En rapprochant ces deux constats, on arrive rapidement à l'idée de recycler le patrimoine numérique

#### **mots-clés**

simulation, équipement didactique, énergie, lycée professionnel, lycée technologique, ingénieur, post-bac

industriel en 3D qui n'a plus de valeur productive en l'utilisant pour créer des supports pédagogiques aussi riches et attractifs que des jeux vidéo, sans qu'il soit besoin d'y investir des sommes aussi conséquentes. De tels supports permettraient d'apprendre les concepts et les lois de la physique aussi bien que la technologie, à différents niveaux, à partir de manipulations et d'expérimentations virtuelles sur de « vrais » objets techniques, que l'on pourrait explorer, faire fonctionner dans des conditions diverses, voire démonter ou réparer.

Un troisième constat est celui de la difficulté pour les enseignants de s'approprier les outils numériques sur étagère, parce qu'ils ne conviennent pratiquement jamais à leur manière d'enseigner et nécessitent une personnalisation. Ce constat a amené à imaginer un langage de scénarisation maîtrisable par les enseignants, indépendant du code informatique, leur permettant de créer ou de modifier facilement des scénarios pédagogiques autour d'objets techniques dans un environnement virtuel.

La conjonction de ces trois constats est à la base du projet EAST et a défini ses objectifs : utiliser le patrimoine numérique obsolète des entreprises pour créer des environnements d'apprentissage des sciences et de la technologie où les scénarios pédagogiques seraient modifiables à volonté.

En même temps que ces réflexions aboutissaient à des propositions concrètes et à l'engagement de plusieurs partenaires, le numérique éducatif est devenu un axe prioritaire d'intervention de l'État : plusieurs appels à projets ont été lancés dans le cadre du programme Investissements d'avenir en 2011-2012. L'appel à projets e-Education n° 1, un moment envisagé, ne nous a pas semblé pouvoir soutenir financièrement les propositions que nous envisagions. Par contre, son successeur, e-Education n° 2, présentait toutes les caractéristiques de l'opportunité attendue. Le projet EAST a donc été déposé en réponse à cet appel à projets et a été accepté.

Au démarrage du projet, la découverte d'une thèse portant sur une problématique similaire à la nôtre, et y répondant grâce au langage UML, nous a amenés à rencontrer le laboratoire où cette thèse avait été préparée et soutenue. La convergence de nos préoccupations a facilité le rapprochement et ce laboratoire a finalement rejoint le projet, apportant des outils déjà avancés au niveau de leur implémentation informatique.

[1] Directeur de recherches du Laboratoire d'ingénierie des environnements d'apprentissage (LIEA) au sein du groupe Cesi.

[2] Déposé dans le cadre du second volet e-Education du programme Investissements d'avenir, le projet EAST, labellisé par Cap Digital, a été retenu par le ministère de l'Éducation nationale. Les partenaires sont l'Alfa, le Cesi, Dassault Systèmes, Emissive, l'Enib, l'Insa de Rouen, ORT France, le WindLab Région Picardie et l'Académie de Créteil.

# scientifiques et techniques

## Modélisation de l'environnement, des actions et des scénarios

Une première particularité des applications issues du cahier des charges du projet est qu'elles utilisent des géométries 3D issues de modèles industriels. Elles requièrent donc moins de travail pour les produire que si elles devaient être réalisées à partir de rien. Comme toutes les applications numériques 3D, elles nécessitent du codage informatique, notamment pour créer les comportements des objets et leurs réactions aux actions exercées sur eux. Une seconde particularité est que la couche « pédagogique » utilise des bibliothèques d'actions génériques, qui sont codées une fois pour toutes et peuvent être manipulées sans toucher à l'application, car les scénarios d'interaction avec l'utilisateur sont représentés à l'extérieur de l'application et interprétés dans l'application.

Externaliser les scénarios oblige à décrire d'une manière formelle tout l'environnement, du moins tous les objets de l'environnement sur lesquels il est possible d'agir, ainsi que leurs relations et leurs comportements spontanés ou en réaction aux actions qu'ils subissent. Cela oblige aussi à décrire d'une manière formelle toutes les actions possibles sur les objets de l'environnement, qu'il s'agisse « d'actions métier », c'est-à-dire d'actions accomplies ordinairement par un professionnel sur l'objet, ou « d'actions pédagogiques », c'est-à-dire d'actions destinées à faciliter l'apprentissage des « actions métier ». Ces descriptions sont faites à l'aide de diagrammes UML. L'ensemble de l'environnement, des objets, de leur comportement et des actions possibles sur les objets sont donc décrits par un projet UML, qui est traduit en un fichier XML normalisé (XMI). Ce fichier est lu et interprété dans l'environnement par l'application. Les types de diagrammes UML utilisés sont les suivants :

1. L'environnement d'apprentissage et tous les objets qu'il contient sont représentés par des *diagrammes de classes* ; le comportement des objets est représenté par des *diagrammes de machines à états* ; les instances des objets sont représentées par des *modèles d'instances*.

2. Les suites d'actions sur les objets ou les procédures métiers sont représentées par des *diagrammes d'activités*. Lorsque plusieurs acteurs (par exemple l'apprenant et l'enseignant) concourent à une activité, il est recommandé d'utiliser les *partitions* et de décrire l'activité globale pour l'ensemble des acteurs, chaque

action étant inscrite dans la partition de l'acteur réel ou virtuel l'exécutant. Les *rôles* doivent alors être décrits en tant que classes (*interface*) et faire l'objet d'instanciations (*modèles d'instances*).

3. Les modèles pédagogiques ou les scénarios pédagogiques, qui sont des suites d'actions particulières, sont aussi représentés par des *diagrammes d'activités*, mêlant des actions de l'apprenant sur les objets de l'environnement et des « actions pédagogiques » de contrôle ou de guidance exécutées par le système (formateur virtuel). Il est donc aussi recommandé d'utiliser les *partitions* pour décrire les modèles pédagogiques ou les scénarios pédagogiques, afin de pouvoir décrire le rôle de « tuteur » ou de « formateur » guidant ou corrigeant les actions de l'apprenant, et ses interactions avec les actions de l'apprenant.

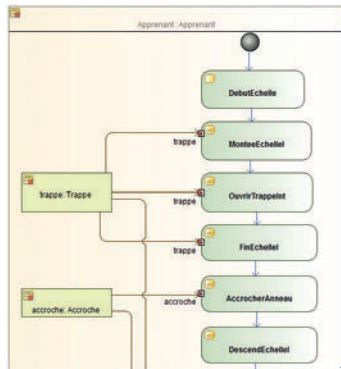
## Répartition des rôles dans le développement d'une application

Quatre catégories d'acteurs concourent à la conception des environnements d'apprentissage du projet EAST et des applications qui en résultent. Chacun des acteurs listés ci-dessous décrit les éléments de l'environnement d'apprentissage dont il a la charge à l'aide de modèles UML spécifiques stockés dans le projet UML global. La chaîne de production est représentée dans le schéma 1 :

1. Le « designer » conçoit l'environnement d'apprentissage, les objets 3D qu'il contient, leurs comportements, à partir de sources diverses : documents numériques industriels, photos, bibliothèques de comportements... Il écrit aussi le code nécessaire à l'exécution des actions proposées par « l'expert-métier » et par le « pédagogue expert en réalité virtuelle ». Il est aussi celui qui permet l'exécution de l'environnement d'apprentissage en « instanciant » les objets avec des géométries et des routines permettant l'exécution des comportements, ainsi que les rôles avec les acteurs réels qui vont intervenir.

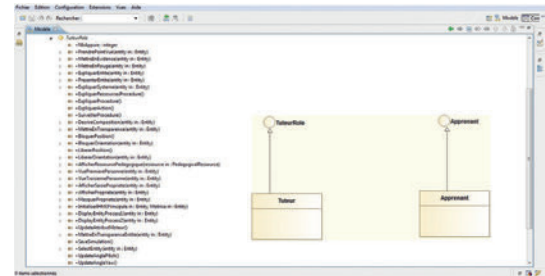
2. L'« expert-métier » connaît l'activité qui fait l'objet de l'apprentissage et formalise les « actions métier », c'est-à-dire la suite d'actions et d'interactions avec les objets qui constituent l'activité, en tenant compte des « bonnes pratiques » du métier (procédures) qui devront être acquises par l'apprenant dans l'environnement d'apprentissage. Il réalise les diagrammes d'activités représentant les « actions métier » ou les procédures et fournit au designer le cahier des charges permettant de les réaliser dans l'application.

Expert métier



Procédures métiers

Pédagogue - Expert RV

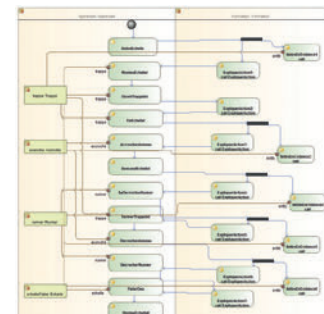
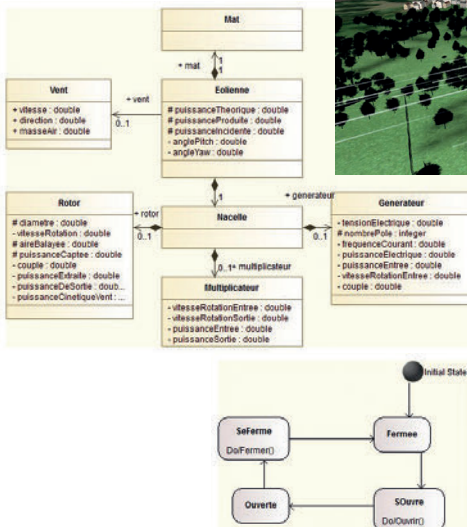


Modèles pédagogiques

Designer

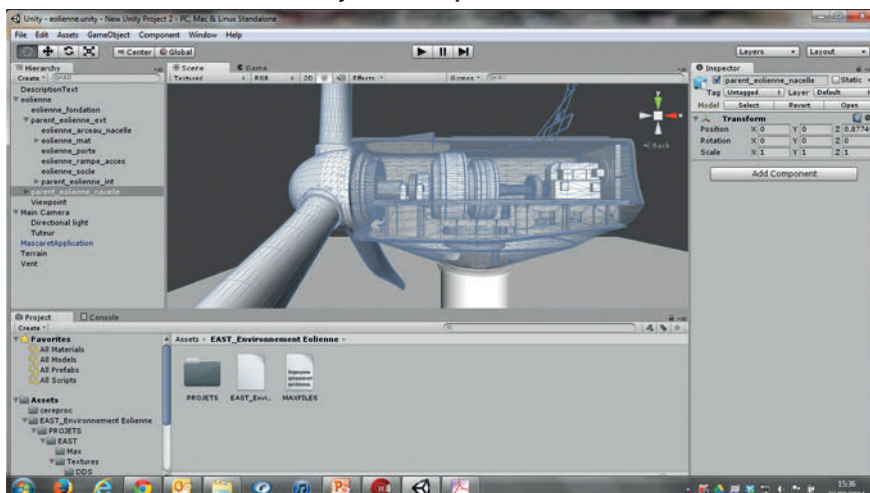


Enseignant



Scénario pédagogique

Objets et comportements



1 L'ensemble de l'environnement, des objets, de leur comportement et des actions possibles sur les objets sont décrits par un projet UML

3. Le « pédagogue expert en réalité virtuelle » définit les « actions pédagogiques » que l'on peut utiliser pour guider ou corriger l'apprenant dans un environnement en réalité virtuelle, ainsi que les modèles pédagogiques (séquences types d'actions/réactions ou d'interactions). Les « actions pédagogiques » simples (afficher un message, mettre un objet en surbrillance...) sont codées par le designer. Des « actions pédagogiques » plus complexes combinent ces actions simples et sont représentées par des diagrammes d'activités. Ces deux types « d'actions pédagogiques » constituent la bibliothèque dans laquelle va puiser le « formateur-métier » (ou l'enseignant) pour réaliser ses scénarios pédagogiques.

4. Le « formateur-métier » (ou l'enseignant) définit les scénarios pédagogiques (ensemble ordonné de situations dans lesquelles l'apprenant va mener des actions et des interactions avec les objets de l'environnement), ainsi que les « actions pédagogiques » qui seront menées sous contrôle du système pour guider ou corriger les actions de l'apprenant. Pour définir les scénarios pédagogiques, le formateur-métier (ou l'enseignant) s'appuie sur :

- l'environnement et les objets existants dans celui-ci (créés par le designer) ;
- les actions possibles de l'apprenant sur les objets et les procédures (créés par l'expert-métier) ;
- les modèles et les « actions pédagogiques » (créés par le pédagogue expert en réalité virtuelle).

Ces éléments lui sont donnés : le « formateur-métier » (ou l'enseignant) n'intervient que pour positionner les « actions pédagogiques » au regard des « actions-métier » que doit exécuter l'apprenant dans sa partition. Concrètement, il n'a qu'à décrire la partition du « formateur » virtuel à l'aide des « actions pédagogiques » disponibles en bibliothèque et à les lier aux phases des « actions métiers » et aux objets appropriés de la partition de l'apprenant produite par « l'expert-métier ». Une fois le scénario pédagogique décrit en UML, le « formateur-métier » (ou l'enseignant) génère le fichier XMI du projet contenant ses ajouts ou ses modifications, et celui-ci sera interprété à la prochaine exécution de l'application.

Les applications EAST sont livrées sans « pédagogie embarquée », pourrait-on dire. C'est au « formateur-métier » ou à l'enseignant utilisateur d'intégrer la pédagogie qu'il souhaite dans l'application, ou autour de l'application, à moins qu'il ou elle ne préfère utiliser un scénario existant, créé par un(e) collègue.

### Les démonstrateurs

Pour donner du sens aux apprentissages qu'ils permettront de réaliser, les démonstrateurs EAST ont été positionnés dès la réponse à l'appel à projets sur des objets « qui contribuent eux-mêmes à résoudre les grands problèmes actuels (énergies renouvelables, transports non polluants, etc.) ». Deux objets techniques différents étaient prévus. Le premier objet retenu, sur

proposition d'un industriel intéressé, a été une éolienne. Le modèle utilisé est celui d'une GE 1,5 MW, qui est la machine la plus utilisée dans le monde pour parcs éoliens terrestres. Le deuxième objet technique retenu l'a été après concertation avec l'Inspection générale de l'Éducation nationale. Il s'agit d'une centrale thermique à cogénération (chaleur + électricité). Le modèle utilisé est inspiré d'une centrale réelle de la région parisienne, dont il reprend quelques éléments fournis par le bureau d'études qui l'a conçu, avec l'accord de l'exploitant qui a donné les spécifications techniques.

### L'éolienne

L'éolienne GE 1,5 MW est de type Mada (machine asynchrone à double alimentation). Le mât fait environ 70 m de hauteur, les pales mesurent environ 30 m. La chaîne de transformation énergétique comprend les principaux équipements suivants : le rotor, une boîte de vitesses (multiplicateur) et le générateur. Ces équipements sont placés dans la nacelle. Les géométries utilisées sont très détaillées, puisqu'elles sont utilisées pour trois démonstrateurs :

- un simulateur ;
- un démonstrateur pour découvrir les principes de base de la sécurité ;
- un démonstrateur simulant une opération de maintenance préventive (auscultation du multiplicateur).

Il a fallu compléter les modèles 3D fournis pour avoir un niveau de détail suffisant de tous les équipements utiles aux démonstrateurs (armoires électriques, automates de contrôle...).

Le simulateur permet de faire fonctionner la machine d'une manière réaliste. Il est fondé sur un modèle empirique issu d'une thèse en électrotechnique ayant étudié la machine modélisée. Ce modèle permet de relier la puissance produite à trois paramètres : la vitesse du vent, le ratio de vitesse spécifique (paramètre mesuré empiriquement qui tient compte de la géométrie des pales) et l'angle du *pitch*. Le principal paramètre que l'on peut faire varier est la vitesse du vent (de 0 à 20 m/s par incrément de 1 m/s). On peut aussi régler l'angle du *pitch* (orientation des pales) et faire tourner la nacelle par rapport au vent (*yaw*), pour la caler face à celui-ci. Ces paramètres sont normalement réglés par l'automate, mais dans le simulateur ils doivent être réglés manuellement. Le ratio de vitesse spécifique est fourni par une table donnant sa valeur par rapport à la vitesse du vent. De ce fait, le modèle convient pour les situations de fonctionnement normal, mais ne permet pas de prévoir ce qui se passe en cas de fonctionnement anormal (angle du *pitch* trop faible par rapport à la vitesse du vent, nacelle prenant le vent de travers, etc.). Dans ces conditions de fonctionnement, un message indique que l'on sort des limites du modèle et les risques pour le matériel (contraintes trop importantes sur le rotor ou sur le mât) sont indiqués par un virage de leur couleur au rouge.



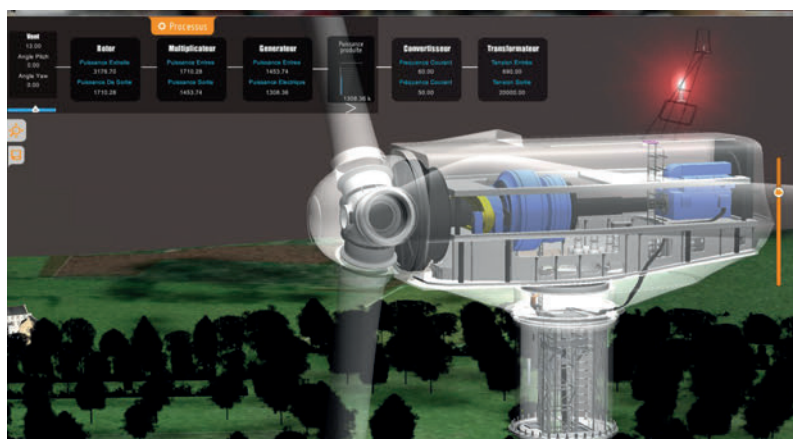
Le simulateur **2** permet de faire varier les paramètres indiqués, d'afficher la chaîne de transformation de puissance, ainsi que celle d'ajustement du courant produit au réseau. Un clic sur un élément de la chaîne permet d'afficher les valeurs de toutes les variables de l'élément (variables d'état et de flux). Ces informations peuvent être enregistrées dans un fichier Excel pour chaque pas de simulation, afin de pouvoir être traitées ultérieurement (tracés de courbes, par exemple). Mais, outre cela, le simulateur permet aussi de se déplacer dans la scène (rotation, zoom, déplacement vertical de la caméra) pour offrir une visite virtuelle de la machine : un bouton permet de mettre l'enveloppe en transparence **3**. Dans ce mode, le clic sur un élément des chaînes de transformation de la puissance ou d'ajustement du courant produit au réseau met l'élément en surbrillance et indique donc sa localisation. L'angle de la nacelle par rapport au vent (*yaw*) se règle grâce à un curseur circulaire **4**, de même que l'angle des pales (*pitch*) **5**. Les zones de fonctionnement à risque en dehors des limites du modèle indiquent par une couleur rouge les éléments soumis à des contraintes anormales **6**.

Le démonstrateur d'initiation à la sécurité permet de se familiariser avec les éléments de base de la sécurité liés au travail en hauteur dans l'éolien : montée des échelles, utilisation des lignes de vie, localisation des équipements de sécurité (anneaux d'accrochage des lignes de vie, trappe et treuil d'évacuation...). Le but de ce démonstrateur est de faire monter un avatar dans le mât jusqu'au sas sous la nacelle **7**, puis dans la nacelle, d'explorer la nacelle **8** et enfin de sortir sur le toit de la nacelle **9**, sans oublier, dans la montée des échelles, de garder toujours trois points d'appui et, à chaque étape, d'accrocher ou décrocher une ou plusieurs lignes de vie, d'ouvrir et de fermer les trappes...

Le démonstrateur de maintenance permet de dérouler de bout en bout une procédure de maintenance préventive, depuis la réception de l'ordre de mission jusqu'à l'enregistrement de l'opération dans la base du système de maintenance, en respectant les étapes et les procédures. Cela commence dans le bureau de l'entreprise de maintenance **10** : lecture de l'ordre de mission, vérification que la météo permet l'intervention demandée. Si c'est le cas, les outils appropriés sont sélectionnés et mis dans le sac avec les équipements. Arrivé au pied de l'éolienne, il faut à nouveau vérifier que le temps est stable et permet l'intervention, puis prévenir l'exploitant que la machine sera arrêtée pour l'intervention. Après l'entrée dans le mât de l'éolienne, il faut l'arrêter et la consigner **11**. On saute l'étape de l'équipement (casque, harnais), qui pourra faire l'objet d'un démonstrateur séparé, ainsi que la montée dans le mât, qui est traitée dans le démonstrateur de sécurité. On est ensuite transporté dans la nacelle pour ausculter la boîte de vitesses **12**. L'ensemble de la procédure est simulé (déblocage manuel du frein, dévissage du



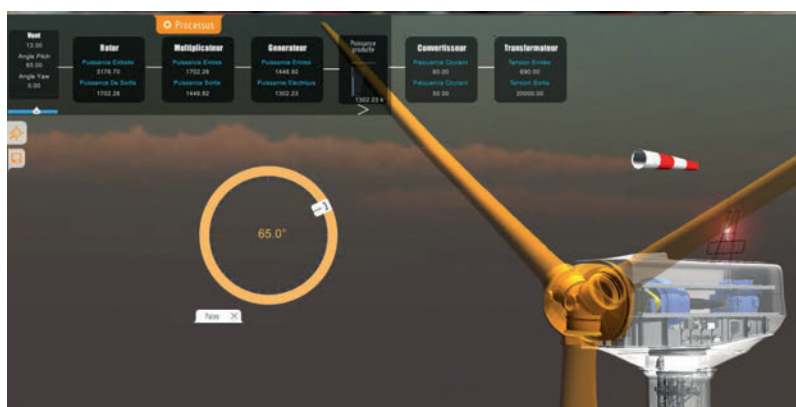
**2** Les paramètres du simulateur de l'éolienne



**3** Visite virtuelle avec mise en transparence de l'enveloppe



**4** Réglage de l'angle de la nacelle par rapport au vent (*yaw*)



5 Réglage de l'angle des pales (pitch)



6 Visualisation (en rouge) des éléments soumis à des contraintes anormales



7 Démonstrateur de sécurité : avatar arrivant dans le sas de la nacelle et fermant la trappe d'accès



8 Démonstrateur de sécurité : avatar grim pant à l'échelle d'accès au toit de la nacelle



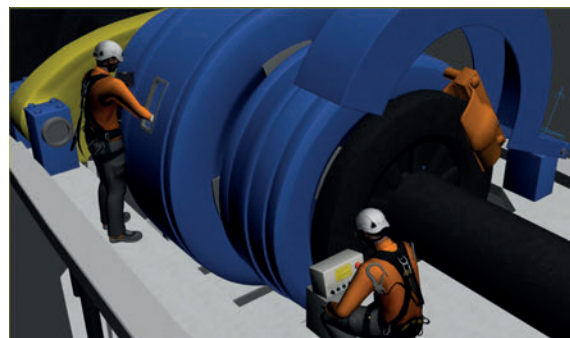
9 Démonstrateur de sécurité : avatar sortant sur le toit de la nacelle



10 Démonstrateur de maintenance : bureau de l'entreprise de maintenance



11 La centrale thermique : automate au pied du mât permettant l'arrêt de l'éolienne en vue de sa maintenance



12 Démonstrateur de maintenance : dans la nacelle, auscultation de la boîte de vitesses



regard d'auscultation, passage de l'endoscope, rotation manuelle de l'arbre, etc.). La séquence se termine avec le ramassage des outils. Une fois redescendu, il reste à déconsigner la machine, à la remettre en route et à prévenir l'exploitant avant de retourner au bureau faire son rapport.

### La centrale thermique avec unité de cogénération

Deux bâtiments seulement de la centrale réelle ont été gardés pour la maquette numérique EAST : le bâtiment contenant la turbine de cogénération et la chaudière de récupération, et le bâtiment contenant les trois chaudières à gaz. Celles-ci sont utilisées en appoint lorsque la turbine ne suffit pas à satisfaire la demande ou lorsque la turbine est arrêtée (actuellement, la production d'électricité n'est autorisée que du 1<sup>er</sup> novembre au 31 mars). Les caractéristiques des équipements, les débits d'eau et de gaz et les températures d'entrée et de sortie de l'eau chaude sanitaire et du circuit de chauffage sont celles fournies par l'exploitant. Les caractéristiques du gaz utilisé déterminent son pouvoir calorifique et permettent de calculer les rejets dans l'atmosphère (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>).

Le seul démonstrateur qui sera réalisé dans le cadre du projet est un simulateur du fonctionnement de la centrale, qui permet à la fois sa visite virtuelle et une simulation de son fonctionnement 13. Trois modes de visualisation existent : une représentation réaliste de la centrale dans son environnement, le mode « sans murs » permettant de visualiser les équipements (chaudières, turbines, alternateur...) dans l'environnement, le mode « transparence » permettant de visualiser les équipements et le réseau les reliant 14.

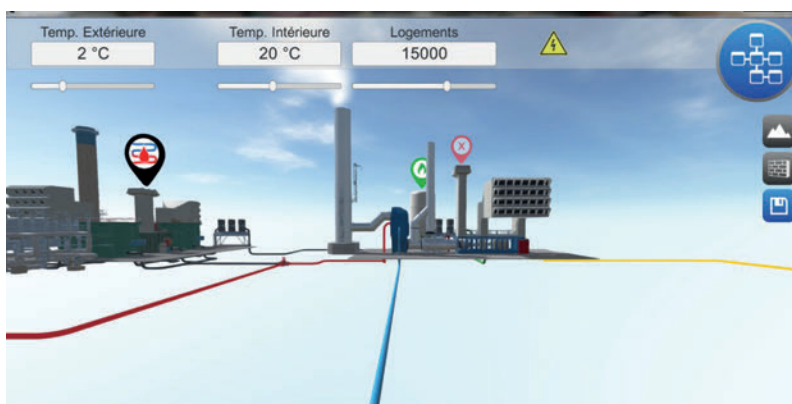
Le modèle mathématique du fonctionnement a été réalisé par un collègue ayant un doctorat en thermique énergétique et génie des procédés. Les variables d'entrée, sur lesquelles l'utilisateur peut jouer, sont la température extérieure (de -10 à +40 °C, par pas de 1 °C), la température intérieure des logements demandée (de 16 à 25 °C, par pas de 1 °C), le nombre de logements desservis (de 5 000 à 20 000, par tranche de 1 000 logements). L'utilisateur dispose aussi d'un *switch* pour décider ou non de produire de l'électricité. Chaque élément du système est visible dans le mode « sans murs », mais aussi lorsque l'on clique sur l'icône qui le surmonte. Le passage de la souris sur un composant le met en surbrillance, et un clic permet d'afficher la valeur des variables d'entrée et de sortie qui le caractérisent (puissance en entrée et en sortie, rendement, rejets, débits, températures...) 15. L'ensemble des valeurs de toutes les variables à un instant donné peut être enregistré en cliquant sur l'icône « disquette ». Les valeurs peuvent aussi être affichées sur un synoptique représentant l'état du système global en fonctionnement 16.

### Les expérimentations

Jusqu'à présent, seul le simulateur d'éolienne a été expérimenté à grande échelle. Les expérimentations, réalisées en 2014 et 2015, ont concerné des élèves du secondaire (seconde et seconde bac pro, première SSI, première STI2D, première bac pro SEN, terminale SSI, terminale STI2D, terminale bac pro ELEC, terminale bac



13 La centrale thermique : visite virtuelle et fonctionnement



14 La centrale thermique : mode transparent visualisant les équipements et les réseaux de liaison

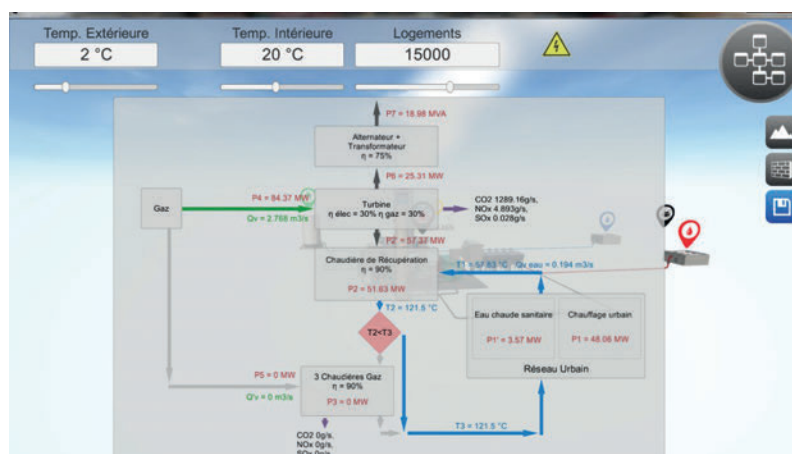


15 La centrale thermique : affichage des variables d'entrée et de sortie par un clic sur l'élément

pro SEN), des élèves de l'enseignement supérieur (BTS, ingénieur généraliste, ingénieur génie civil) et des stagiaires de formation continue (techniciens de maintenance Afp, techniciens de maintenance éolienne au WindLab d'Amiens). En tout, 1 061 élèves, encadrés par 59 enseignants, ont participé aux expérimentations. Celles-ci ont été menées à partir de onze scénarios pédagogiques différents conçus par les enseignants pour leurs publics. Dans ces scénarios, le simulateur était utilisé comme support d'exercices variés. Les durées de ces expérimentations étaient pour la plupart d'une demi-journée (découverte de l'éolien, travaux pratiques), sauf celles en formation d'ingénieurs, où la durée était de trois jours pour l'une (projet d'implantation d'un parc éolien où le simulateur a été utilisé pour découvrir le principe de fonctionnement) et de trois mois pour l'autre (projet d'amélioration du rendement de la machine, où le simulateur a été utilisé à plusieurs reprises pour découvrir les principes, valider un modèle mathématique et établir une référence). Des entretiens avec les élèves et les enseignants ont été menés, faisant ressortir l'intérêt pour l'utilisation de tels outils, ainsi que la facilité d'utilisation dans le cadre des scénarios pédagogiques produits. Quelques expérimentations ont été menées avec le démonstrateur « sécurité » en mode immersif **17**. Ces expérimentations avaient pour but de tester d'autres modes d'interaction avec le démonstrateur, dans la perspective d'imaginer

de nouveaux scénarios d'apprentissage bénéficiant pleinement du mode immersif.

À partir de 2016, il est prévu d'expérimenter les deux simulateurs (éolienne et centrale thermique) avec des publics allant du secondaire à l'ingénieur, et d'expérimenter aussi les démonstrateurs « sécurité » et « maintenance » avec des stagiaires de la formation professionnelle. En tout, entre 1 500 et 2 000 nouveaux élèves et stagiaires devraient y participer. ■



**16** La centrale thermique : affichage de l'état du système global en fonctionnement



**17** Expérimentation en mode immersif de l'environnement éolien afin d'enrichir la palette de scénarios