

Virtualisation des PI-conteneurs et premières applications dans un contexte d'Internet Physique

PATRICK CHARPENTIER¹, NICOLAS KROMMENACKER¹, YVES SALLEZ²

¹ UNIVERSITE DE LORRAINE, CRAN CNRS UMR 7039
Campus Sciences, BP 70239
Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, 54506, France
{patrick.charpentier,nicolas.krommenacker}@univ-lorraine.fr

² UNIVERSITE DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS, LAMIH CNRS UMR 8201
Valenciennes, 59313, France
yves.sallez@univ-valenciennes.fr

Résumé – Dans le cadre de l'Internet Physique, les objets manipulés sont des conteneurs modulaires standardisés. Ces conteneurs peuvent être porteurs d'un certain nombre de données ou d'informations nécessaires lors des différentes opérations liées à leur transport et manutentions. Différentes technologies sont potentiellement utilisables afin de conférer une forme d'intelligence aux conteneurs. Parmi ces technologies, les WSN (Wireless Sensor Network), permettent d'imaginer de nouveaux services aptes à apporter une valeur ajoutée lors des différentes phases d'usage des conteneurs. Dans le cadre de ce papier, nous présentons une exploitation possible des capacités de ces WSN pour générer un modèle spatial 3D (ou virtualisation 3D) en temps réel de l'arrangement des conteneurs du monde réel. Ce modèle spatial peut ensuite être exploité afin d'offrir divers services. Nous présentons ici un exemple lié au déchargement partiel d'un conteneur.

Abstract - As part of the Physical Internet, the handled objects are standardized modular containers. These containers can carry a number of data or information needed during the various operations related to transportation and handling. Different technologies can potentially be used to confer a form of intelligence to containers. Among these technologies the WSN (Wireless Sensor Network) allow us to imagine new services able to provide added value during the different phases of use of the containers. In the context of this paper, we present a possible exploitation of these WSN capabilities to generate a 3D spatial model (or 3D virtualization) of the real world containers arrangement in real time. This spatial model can then be used to provide various services. We present here an example related to partial unloading of a container.

Mots clés – Internet Physique, Conteneurs intelligents, Virtualisation 3D, Réseau de Capteurs sans Fils.

Keywords - Physical Internet, Smart Container, 3D Layout, Wireless Sensor Networks.

1 INTRODUCTION

L'Internet Physique a été introduit pour transformer globalement la manière dont les objets physiques sont manipulés, déplacés, entreposés, réalisés, fournis et utilisés. L'introduction de ce nouveau paradigme est liée au constat sans ambiguïté réalisé sur la non durabilité de la logistique actuelle [Ballot et al., 2014]. L'Internet Physique cherche à concilier les objectifs économiques, environnementaux et sociétaux des chaînes logistiques, en s'inspirant du modèle d'infrastructure distribué et ouvert de l'Internet. Les initiateurs de ce paradigme proposent ainsi un écosystème logistique différent, à savoir : « *Un système logistique mondial ouvert exploitant des réseaux d'approvisionnement interconnectés qui utilisent un ensemble de protocoles collaboratifs, de conteneurs modulaires et*

d'interfaces intelligentes standards pour accroître l'efficacité et la durabilité » [Ballot, 2012].

L'une des caractéristiques importante de l'Internet Physique est liée à l'encapsulation des marchandises dans des conteneurs modulaires standardisés (à l'image des paquets de données sur l'Internet). Ces conteneurs, dénommés PI-Conteneurs, sont ensuite manipulés, entreposés, routés, expédiés par des infrastructures logistiques (PI-Hubs) organisées à la manière de l'Internet avec ses routeurs. Pour ce faire, il est nécessaire que les conteneurs, outre leur standardisation, puissent être des éléments actifs de l'automatisation de la chaîne ainsi créée. L'« intelligence » introduite au niveau des conteneurs peut prendre différentes formes, et être supportée par différentes technologies. Dans le contexte de l'Internet Physique, et plus

globalement de la logistique, on peut citer par exemple, les cibles applicatives suivantes :

- Identification des conteneurs par WSN et RFID [Dittmer et al., 2012]
- Localisation des conteneurs par WSN ou GPS et RFID dans les travaux de [Dittmer et al., 2012], [Zhang et al., 2009].
- Surveillance de paramètres à l'intérieur des conteneurs par WSN [Lang et al., 2011], [Hsiao et al., 2014]
- Sécurité des conteneurs par RFID [Kim et al., 2008],

L'identification des conteneurs et de leur contenu est dans tous les cas nécessaire dans le cadre de l'Internet Physique. Les autres applications évoquées ici dépendent en partie de la nature des marchandises conteneurisées. L'automatisation de l'Internet Physique lors des phases de manipulation, entreposage, routage, í concerne donc ces conteneurs standards et génériques. Les contributions de ce papier s'inscrivent dans cette ligne, les objets sous études sont les conteneurs (indépendance vis-à-vis des marchandises conteneurisées).

Dans ce papier, un lien est dans un premier temps établi entre le monde réel (celui des conteneurs standardisés dans le contexte de PI) et le monde virtuel par le biais d'une instrumentation des conteneurs permettant une virtualisation de ceux-ci. Sur la base du modèle virtuel ainsi obtenu, et à titre d'exemple applicatif, nous présentons en quoi cette contribution peut être utile lors des phases de chargement et de déchargement des conteneurs.

Pour ce faire, la section 2 présente dans un premier temps le concept des PI-conteneurs. La section 3 introduit la proposition de ce papier, puis les possibilités offertes par les WSN pour aboutir à une virtualisation 3D des conteneurs. La section 4 décrit le processus de virtualisation et le modèle mathématique proposé, ainsi que les résultats obtenus sur un exemple simple. La section 5 présente un usage possible de ce modèle 3D, à savoir le cas d'un déchargement partiel d'un conteneur composite. Enfin, la section 6 conclut sur cette proposition et ouvre quelques perspectives à ces travaux.

2 LES PI-CONTENEURS

Les PI-conteneurs constituent un élément clé de l'Internet Physique. Cette section présente ces objets et leur principe d'encapsulation.

Trois catégories de PI-conteneurs peuvent être distingués [Sallez et al., 2015] :

- Les conteneurs de transport, ou T-conteneurs, sont les entités transportées par les différents types de véhicules (camions, trains, navires ...). Ils sont conçus pour être facilement transportés et empilés (comme des conteneurs de transport maritime classiques). Ils peuvent directement contenir des marchandises physiques et/ou des PI-conteneurs de plus petite taille. Leurs dimensions sont étudiées [Meller et al., 2012] afin de permettre une optimisation de leur taux de remplissage.
- Les conteneurs de manutention, ou H-conteneurs, contiennent des marchandises physiques et/ou des PI-conteneurs de taille plus petite. Ils sont conçus pour être

facilement manipulés. Leur taille est modulaire et leur permet de tenir dans un T-conteneur.

- Les conteneurs d'emballage, ou P-conteneurs, sont utilisés pour contenir directement les biens physiques. Ils sont dimensionnés pour s'adapter de façon modulaire aux H-conteneurs.

La standardisation de ces éléments à chacun de ces trois niveaux permet, à la manière de poupées gigognes, d'optimiser le remplissage des T-conteneurs par des H-conteneurs, et des H-conteneurs par des P-conteneurs.

Deux projets internationaux s'intéressent actuellement à la conception des PI-conteneurs :

- Le projet européen de MODULUSHCA se concentre sur l'élaboration de prototypes de H-conteneurs. Sur le plan physique, l'accent est mis sur la conception de conteneurs modulaires capables d'être « attachés » ensemble. Cette dernière propriété est utilisée pour construire des blocs de H-conteneurs, permettant de réduire considérablement les temps de manutention.
- LIBCHIP (Montreuil et al. 2015) est un projet s'occupant de l'encapsulation des PI-conteneurs au secteur des biens de consommation. Il se concentre plus particulièrement sur l'environnement nord-américain et aborde les différents niveaux d'encapsulation des PI-conteneurs.

Afin de rendre ces PI-conteneurs actifs, ils peuvent être dotés de capacités informationnelles, décisionnelles et de communication [Sallez et al., 2015]. Cela leur permet de contribuer à (ou à rendre) différents services lors de leur utilisation (chargement, transport, déchargement, manutention, í) comme présenté dans l'introduction. La contribution principale de cet article vise à l'amélioration de l'efficacité de ce type d'opérations logistiques dans le cadre du paradigme de l'Internet Physique par l'exploitation des capacités des WSN intégrés aux PI-conteneurs. La section suivante présente notre proposition et étudie sa faisabilité technique.

3 VERS UNE VIRTUALISATION 3D DES CONTENEURS

3.1 Proposition

Le modèle de fonctionnement de l'Internet Physique, s'il rationalise les transports engendre des manutentions plus nombreuses [Ballot, 2012]. Dans les PI-hubs, les opérations de routage, de déchargement et (re)chargement des conteneurs, nécessitent une organisation et une gestion rationnelle. La multiplicité et la diversité des opérations (automatisées ou non) à mettre en œuvre simultanément ne peut être conduite de manière efficace qu'en cas de parfaite synchronisation entre la réalité du système physique et de celle du système informationnel. L'obtention, en temps réel, d'une image ou d'un modèle spatial des PI-conteneurs constitue une solution potentielle à ce problème de synchronisation.

Cette virtualisation du monde réel (celui des différents niveaux de conteneurs) n'est envisageable que sous certaines conditions ou contraintes de type :

1. Economiques : la solution technique préconisée ne doit pas alourdir les coûts de déploiement des solutions déjà utilisées pour l'identification, la sécurité, la localisation, í des conteneurs,

2. Informationnelles : le système déployé doit être capable de supporter le principe d'encapsulation des PI-conteneurs physiques,
3. Dynamique : afin de refléter en temps réel la configuration « spatiale » des conteneurs,
4. Multi-services : en permettant au final d'offrir des services nouveaux à tous les acteurs de l'Internet Physique.

Comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, les WSN sont utilisés (ou utilisables) dans le cadre de l'Internet Physique. Notre proposition se base sur l'hypothèse que les nœuds de ces WSN sont reliés aux différents PI-conteneurs et sont déjà utilisés à d'autres fins que celle que nous présentons dans le cadre de ce papier. Ces nœuds possèdent des capacités computationnelles leur permettant d'implémenter aisément le principe d'encapsulation, mais également de générer de l'information sur la base des données proprioceptives et/ou extéroceptives qu'ils peuvent capter en temps réel. Enfin, et nous en présenterons un exemple, il est possible d'offrir, par le biais du modèle spatial 3D (ou virtualisation 3D) obtenue par ces WSN, de nouveaux types de services pour les acteurs de l'Internet Physique.

3.2 Faisabilité technologique : WSN

Un réseau de capteurs est constitué de plusieurs nœuds capables de mesurer des grandeurs physiques (température, humidité, etc.). Ces nœuds autoalimentés sont dotés de capacités de calcul et de communication sans fils, formant ainsi un réseau multi-saut sans infrastructure dont la topologie dépend de la méthode de déploiement des nœuds (prédéterminé ou aléatoire) et de la portée du signal radio.

La miniaturisation des composants électroniques, l'évolution de l'autonomie des batteries et la récupération d'énergies disponibles dans l'environnement (vibratoire, mécanique, thermique, etc.), permettent d'intégrer les nœuds au niveau des conteneurs. En transmettant des informations en temps réel au système d'information, ces nœuds sont utilisés afin d'identifier et de tracer les flux physiques dans la chaîne logistique, à l'instar des technologies RFID. Equipés de capteurs spécifiques, ils peuvent également transmettre d'autres informations utiles liés à l'intégrité du conteneur (températures de stockage, ouverture, etc.). La mise en réseau de ces différents nœuds permet d'envisager d'autres services issus de la coopération entre les capteurs, tels que l'inventaire permanent du conteneur (même en absence de communication avec le SI) ou encore la détection d'incompatibilités entre les marchandises. Ces services nécessitent cependant, en plus de l'identification, de localiser précisément les conteneurs unitaires constituant un conteneur composite.

De nombreux protocoles permettent de déterminer la position des nœuds dans un réseau de capteurs. Parmi les méthodes les plus utilisées, on notera celles utilisant les caractéristiques du signal (puissance, temps de vol, etc.) pour déterminer la distance entre un émetteur et un récepteur. Ces méthodes dites *range-based* peuvent cependant se révéler imprécises dans certaines situations. Par exemple, dans le cas de l'exploitation de la puissance du signal reçu ou RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), la distance entre le transmetteur et le récepteur, l'asymétrie des liens en termes de RSSI et les propriétés isotropes du signal sont autant de facteurs limitant l'usage de cette technique pour estimer la distance dans les réseaux de

capteurs [Heurtefeux et Valois, 2012]. De même, les méthodes utilisant le temps de vol nécessitent de mettre en place des algorithmes de synchronisation entre les nœuds. D'autres protocoles de localisation dits *range-free*, se dispensent de mesurer la distance séparant les nœuds. Ils exploitent des hypothèses sur la connectivité pour identifier la position des nœuds. Ces algorithmes, plus simples à implémenter, présentent également l'avantage d'être indépendant de la qualité du signal reçu.

Dans le cas où les nœuds du réseau de capteurs sont distribués sur les différents conteneurs, les méthodes *Range-based* nécessitent des hypothèses peu réalistes comme la propagation du signal radio équivalente quelle que soit la direction. De plus, l'usage des PI-conteneurs (standards et génériques) dans le contexte de l'Internet Physique nous permet de disposer d'informations précieuses sur les dimensions de chacun. Nous montrons dans la suite que l'exploitation de ces informations ainsi que celles liées à la connectivité des nœuds, permet d'obtenir la position des nœuds dans le réseau de capteurs, et constitue une première étape à la virtualisation de la logistique des PI-conteneurs.

4 PROCESSUS DE VIRTUALISATION

4.1 Principe

Nous considérons que chaque conteneur dispose d'un nœud de capteur fixé à l'un de ses sommets. Ce capteur contient les informations dimensionnelles du conteneur. L'assemblage de différents conteneurs au sein d'un conteneur de plus haut niveau (ci-dessous dénommé conteneur composite) permet de constituer alors un réseau de capteurs. Les différents nœuds de ce réseau peuvent alors communiquer dans un certain rayon de couverture R (paramètre réglable de chaque nœud) et sont capables de générer une liste de leurs voisins (nœuds présents à l'intérieur du rayon de couverture). A partir de ces informations de voisinage et des dimensions de chaque conteneur, nous proposons de construire un modèle 3D (ou layout) du conteneur composite et de ses composants.

La figure 1 illustre ce processus dynamique de construction du modèle spatial des PI-conteneurs.

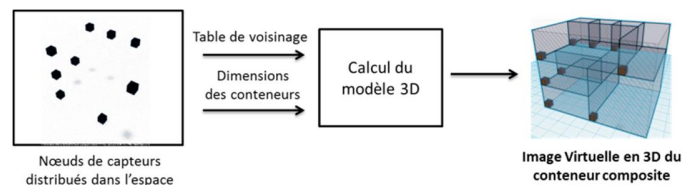


Figure 1. Processus de construction du layout 3D

La sortie attendue correspond à l'image ou vue 3D du système réel (arrangement réel des boîtes dans l'espace).

4.2 Hypothèses

Un certain nombre d'hypothèses ont été prises pour l'implémentation d'une solution de ce problème :

- Un capteur (et un seul) est attaché à chaque conteneur, ce capteur connaît les dimensions du conteneur auquel il est rattaché,

- Tous les capteurs émettent et reçoivent des signaux dans un rayon de couverture R identique pour tous les nœuds,
- Le modèle de transmission des signaux est considéré comme sphérique (cas idéal),
- Tous les conteneurs sont rangés parallèlement au conteneur composite. En revanche leur orientation dans l'espace peut être quelconque.

4.3 Modèle

La problématique posée ici est apparente à celle d'un problème d'arrangement 3D de conteneurs (CLP : Container Loading Problem) [Bortfeldt et Wäscher, 2012]. La solution adoptée est donc ici celle de la programmation mathématique. Outre l'objectif qui est ici différent par rapports aux modèles classiques de CLP, la solution proposée ici diffère par la prise en compte des relations de voisinage entre les nœuds et par son aspect temps réel.

Considérons que m PI-conteneurs de dimensions (L_i, W_i, H_i) , $i=1..m$ sont déjà disposés à l'intérieur d'un PI-conteneur de dimensions (L_c, W_c, H_c) . Un capteur (ou nœud) est physiquement relié à un des sommets de ces m conteneurs. Il stocke des informations sur le PI-conteneur auquel il est relié, *a minima* l'identifiant et les dimensions. Le capteur relié au conteneur composite joue le rôle de passerelle pour le réseau formé par l'ensemble des nœuds. Chacun des nœuds du réseau est capable de créer une table recensant ses voisins à l'intérieur de son rayon de couverture R . Le nœud passerelle récupère ces informations et génère une table complète des voisins pour toutes les paires de nœuds du réseau. L'objectif est ici de (re)construire un modèle (ou layout) 3D de l'arrangement des PI-conteneurs dans le PI-conteneur composite sur la base de ces uniques informations (table des voisins et dimensions des PI-conteneurs).

Un système de coordonnées cartésiennes de 3 dimensions $OXYZ$ est attaché au PI-conteneur composite, avec O le point origine lié à un de ses sommets et les axes OX , OY , OZ respectivement reliés à sa longueur, sa largeur et sa hauteur.

Les variables du problème sont les suivantes:

- (x_i, y_i, z_i) : variables représentant les coordonnées du nœud attaché au PI-conteneur i .
- $(x_{n_0}, y_{n_0}, z_{n_0})$: variables représentant les coordonnées du nœud passerelle attaché au PI-conteneur composite
- (x_i, y_i, z_i) : variables représentant les coordonnées du sommet avant-gauche-bas du PI-conteneur i , ci-après dénommées coordonnées du PI-conteneurs i .
- (l_x_i, l_y_i, l_z_i) : variables binaires indiquant si la longueur (L_i) du PI-conteneur i est parallèle à l'axe X , Y , ou Z . La valeur de l_x_i est égale à 1 si la longueur du PI-conteneur i est parallèle à X , sinon elle est égale à 0. Bien évidemment, $l_x_i + l_y_i + l_z_i = 1$.
- (w_x_i, w_y_i, w_z_i) : variables binaires indiquant si la largeur (W_i) du PI-conteneur i est parallèle à l'axe X , Y , ou Z . La valeur de w_x_i est égale à 1 si la largeur du PI-

conteneur i est parallèle à X , sinon elle est égale à 0. Bien évidemment, $w_x_i + w_y_i + w_z_i = 1$.

- (h_x_i, h_y_i, h_z_i) : variables binaires indiquant si la hauteur (H_i) du PI-conteneur i est parallèle à l'axe X , Y , ou Z . La valeur de h_x_i est égale à 1 si la hauteur du PI-conteneur i est parallèle à X , sinon elle est égale à 0. Bien évidemment, $h_x_i + h_y_i + h_z_i = 1$.

Pour chaque paire de PI-conteneurs (i, j) , un vecteur de 6 éléments binaires $(Right_{ij}, Left_{ij}, Behind_{ij}, Front_{ij}, Below_{ij}, Above_{ij})$ représente leurs positions relatives dans le conteneur composite.

Ces variables sont définies comme suit:

- $Right_{ij} = 1$ si le PI-conteneur j est à droite du PI-conteneur i , sinon $Right_{ij} = 0$.

$$Right_{ij} = \begin{cases} 1 & x_j + l_x_j L_j + w_x_j W_j + h_x_j H_j \leq x_i, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

- $Left_{ij} = 1$ si le PI-conteneur j est à gauche du PI-conteneur i , sinon $Left_{ij} = 0$.

$$Left_{ij} = \begin{cases} 1 & x_j + l_x_j L_j + w_x_j W_j + h_x_j H_j \leq x_i, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

- $Behind_{ij} = 1$ si le PI-conteneur j est derrière le PI-conteneur i , sinon $Behind_{ij} = 0$.

$$Behind_{ij} = \begin{cases} 1 & y_j + l_y_j L_j + w_y_j W_j + h_y_j H_j \leq y_i, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

- $Front_{ij} = 1$ si le PI-conteneur j est devant le PI-conteneur i , sinon $Front_{ij} = 0$.

$$Front_{ij} = \begin{cases} 1 & y_j + l_y_j L_j + w_y_j W_j + h_y_j H_j \leq y_i, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4)$$

- $Below_{ij} = 1$ si le PI-conteneur j est dessous le PI-conteneur i , sinon $Below_{ij} = 0$.

$$Below_{ij} = \begin{cases} 1 & z_j + l_z_j L_j + w_z_j W_j + h_z_j H_j \leq z_i, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5)$$

- $Above_{ij} = 1$ si le PI-conteneur j est dessus le PI-conteneur i , sinon $Above_{ij} = 0$.

$$Above_{ij} = \begin{cases} 1 & z_j + l_z_j L_j + w_z_j W_j + h_z_j H_j \leq z_i, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (6)$$

Le nœud i est voisin du nœud j si la distance entre eux est inférieure ou égale au rayon de couverture du capteur ($dist(i, j) \leq R$). La représentation mathématique de cette relation de voisinage pour chaque couple de nœuds (i, j) est définie comme suit :

$$V_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } dist(i, j) \leq R, \forall i \neq j, \\ 0 & \text{if } i = j, \\ -1 & \text{if } dist(i, j) > R, \forall i \neq j, \end{cases} \quad (7)$$

où

$$dist(i, j) = \sqrt{((xn_i - xn_j)^2 + (yn_i - yn_j)^2 + (zn_i - zn_j)^2)},$$

$$\forall \{i, j\} = 1..m+1$$

Le problème posé peut être modélisé de la façon suivante :

$$\underset{(x_i, y_i, z_i), i=1..m}{\text{Minimize}} f = \sum_{i=1}^m \sqrt{(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)} \quad (8)$$

Sous les contraintes suivantes:

Contraintes de non chevauchement :

$$Right_{ij}[x_j - (x_i + lx_i L_i + wx_i W_i + hx_i H_i)] \geq 0, \forall \{i, j\} = 1..m \quad (9)$$

$$Left_{ij}[x_i - (x_j + lx_j L_j + wx_j W_j + hx_j H_j)] \geq 0, \forall \{i, j\} = 1..m \quad (10)$$

$$Behind_{ij}[y_j - (y_i + ly_i L_i + wy_i W_i + hy_i H_i)] \geq 0, \forall \{i, j\} = 1..m \quad (11)$$

$$Front_{ij}[y_i - (y_j + ly_j L_j + wy_j W_j + hy_j H_j)] \geq 0, \forall \{i, j\} = 1..m \quad (12)$$

$$Below_{ij}[z_j - (z_i + lz_i L_i + wz_i W_i + hz_i H_i)] \geq 0, \forall \{i, j\} = 1..m \quad (13)$$

$$Above_{ij}[z_i - (z_j + lz_j L_j + wz_j W_j + hz_j H_j)] \geq 0, \forall \{i, j\} = 1..m \quad (14)$$

$$Right_{ij} + Left_{ij} + Behind_{ij} + Front_{ij} + Below_{ij} + Above_{ij} \geq 1, \forall \{i, j\} = 1..m \quad (15)$$

Contraintes sur les positions des nœuds et des PI-conteneurs correspondants :

$$((x_i + lx_i L_i + wx_i W_i + hx_i H_i) - xn_i)(x_i - xn_i) = 0, \forall i = 1..m \quad (16)$$

$$((y_i + ly_i L_i + wy_i W_i + hy_i H_i) - yn_i)(y_i - yn_i) = 0, \forall i = 1..m \quad (17)$$

$$((z_i + lz_i L_i + wz_i W_i + hz_i H_i) - zn_i)(z_i - zn_i) = 0, \forall i = 1..m \quad (18)$$

Contraintes de voisinage:

$$V_{ij} \sqrt{((xn_i - xn_j)^2 + (yn_i - yn_j)^2 + (zn_i - zn_j)^2)} \leq V_{ij} R, \forall \{i, j\} = 1..m+1 \quad (19)$$

Contraintes de capacité du conteneur composite:

$$x_i + lx_i L_i + wx_i W_i + hx_i H_i \leq L_c, \forall i = 1..m \quad (20)$$

$$y_i + ly_i L_i + wy_i W_i + hy_i H_i \leq W_c, \forall i = 1..m \quad (21)$$

$$z_i + lz_i L_i + wz_i W_i + hz_i H_i \leq H_c, \forall i = 1..m \quad (22)$$

Contraintes de binarité:

$$lx_i + ly_i + lz_i = 1, \forall i = 1..m \quad (23)$$

$$wx_i + wy_i + wz_i = 1, \forall i = 1..m \quad (24)$$

$$hx_i + hy_i + hz_i = 1, \forall i = 1..m \quad (25)$$

$$lx_i + wx_i + hx_i = 1, \forall i = 1..m \quad (26)$$

$$ly_i + wy_i + hy_i = 1, \forall i = 1..m \quad (27)$$

$$lz_i + wz_i + hz_i = 1, \forall i = 1..m \quad (28)$$

La minimisation de la fonction (8) cherche à positionner les PI-conteneurs au plus près du point d'origine. Les contraintes (9)-(15) permettent de s'assurer que les PI-conteneurs ne se chevauchent pas. Les contraintes (16)-(18) représentent les

relations entre les coordonnées des nœuds et celle des PI-conteneurs. Les contraintes (19) permettent de s'assurer que les distances entre les nœuds satisfont les relations de voisinage de la table des voisins. Les contraintes (20)-(23) permettent de s'assurer que tous les PI-conteneurs sont contenus dans le volume correspondant au conteneur composite.

Afin de prouver la faisabilité de notre approche, ce modèle a été implémenté sous Matlab. Nous avons utilisé le solveur «fmincon» et l'algorithme SQP (Programmation semi-quadratique).

4.4 Cas d'étude

Ce modèle a été testé sur le cas d'étude présenté par (Meller et al., 2012). Dans cet exemple 9 PI-conteneurs aux dimensions normalisées sont disposés au sein d'un conteneur composite. La figure 2 présente cet exemple support à notre validation.

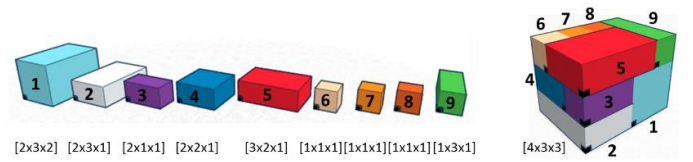


Figure 2. Exemple implémenté (les nœuds sont représentés par des petits carrés noirs)

Dans cet exemple, le volume de l'ensemble des PI-conteneurs correspond parfaitement au volume du conteneur composite (pas de vide). Cette hypothèse diminue le nombre de solutions possibles obtenues par le changement d'orientation des PI-conteneurs. Dans le scénario présenté, nous supposons que les coordonnées des nœuds fixés aux PI-conteneurs sont similaires aux coordonnées du coin avant gauche-bas des PI-conteneurs. La figure 3 illustre les relations de voisinage existant entre chacun des nœuds (avec $R=2$) obtenues par le réseau pour cet exemple. Les coordonnées des nœuds sont indiquées sur ce graphe sans qu'elles soient utilisées par le modèle. L'objectif du modèle est bien sûr de retrouver cet arrangement, et donc les coordonnées des nœuds.

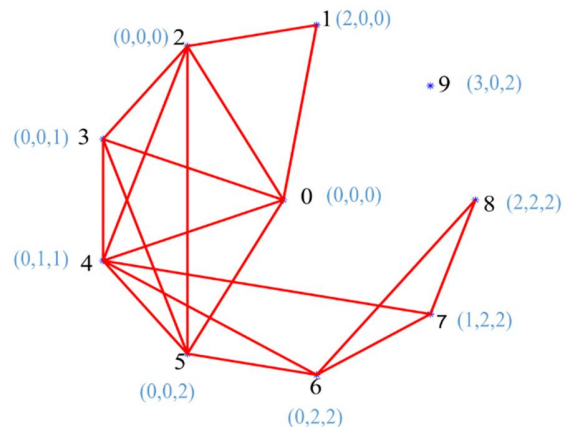


Figure 3. Graphe des voisins obtenu par le WSN

4.5 Résultats et discussions

Les résultats obtenus par le biais du modèle proposé conduisent à un agencement des PI-conteneurs en tout point similaire à ceux de la situation réelle. L'objectif est donc atteint. Il est possible de visualiser cet agencement à partir des variables du modèle tel que présenté figure 4.

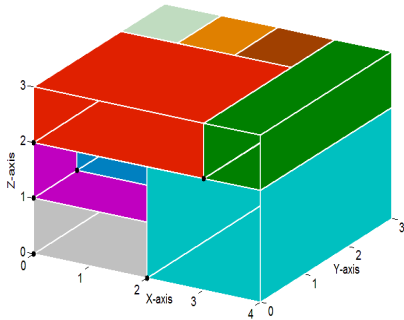


Figure 4. Image obtenue après exécution du modèle

A ce stade, et à partir d'autres essais également réalisés, plusieurs remarques peuvent être faites :

- Le temps de calcul est pour l'instant trop élevé (de l'ordre de 30 minutes pour ce cas), et il semble en l'état difficile à utiliser cet outil ou ce modèle pour obtenir en temps réel une virtualisation de l'état réel du système étudié. L'objectif était ici de montrer la faisabilité de notre approche.
- Le rayon de couverture R influence la solution obtenue. Une valeur de R trop faible ou trop élevée permet au solveur de générer des solutions qui ne correspondent pas à la réalité. Plusieurs pistes sont déjà envisagées pour contourner ce problème, comme par exemple celle de rendre R variable et de chercher à le minimiser (ce qui concourrait d'ailleurs à minimiser l'énergie consommée par les nœuds !)

5 APPLICATION AU CHARGEMENT ET DECHARGEMENT

L'obtention, en temps réel, d'une image ou d'un modèle spatial des PI-conteneurs constitue une solution pour la synchronisation entre la réalité du système physique et de celle du système informationnel. Ce modèle peut trouver de multiples usages dans le cadre de l'internet physique. Nous présentons dans cette partie une possible application liée au chargement/déchargement des PI-conteneurs.

Dans un premier temps, et sur la base de l'exemple précédent, nous considérons que le PI-conteneur 9 vient d'être déchargé (cf figure 5). L'objectif est de montrer ici que le modèle produit la nouvelle image du système sans le PI-conteneur 9.

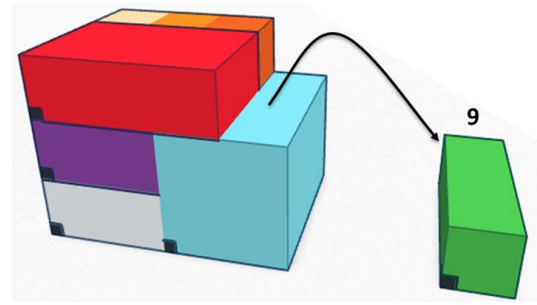


Figure 5. Déchargement du PI-conteneur 9

Le nœud 9 n'apparaît plus dans la table des voisins. Le modèle est ré-exécuté et génère la nouvelle image correspondant à l'état réel du système sans le PI-conteneur 9.

A titre d'exemple, et sur la base du modèle 3D obtenu par notre modèle mathématique, il est possible de fournir une aide au déchargement du conteneur composite. En effet il est possible de générer un graphe de déchargement, fonction de la situation réelle du conteneur, et permettant d'accéder de manière la plus efficace possible à un quelconque des PI-conteneurs. Ce graphe permet par exemple de répondre à une question du type : quels sont les PI-conteneurs à décharger pour accéder au PI-conteneur 4 sur le cas étudié précédemment ?

Le graphe complet de précedence des opérations de déchargement correspondant au modèle spatial 3D de l'exemple est présenté figure 6.

Les nœuds de ce graphe orienté représentent ici les ID des PI-conteneurs, un arc du nœud i (origine) vers le nœud j (extrémité) indique que i doit être déchargé pour pouvoir accéder à j . En parcourant ce graphe, on peut ainsi déterminer que pour accéder à 4, il faudra auparavant décharger 5, 6 et 7.

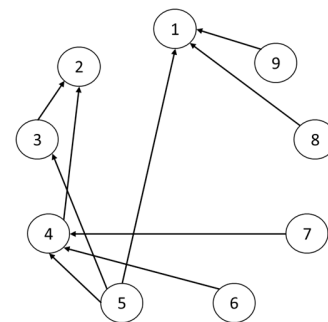


Figure 6. Graphe de précedence pour le déchargement

La génération de ce graphe de précedence s'effectue naturellement en fonction des positions relatives des PI-conteneurs et de leurs dimensions obtenues via le modèle 3D.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce papier, l'exploitation des capacités et possibilités offertes par les WSN, dans le cadre de l'internet Physique, ont été utilisées afin d'obtenir un modèle spatial 3D (ou virtualisation 3D) de PI-conteneurs. Cette représentation de la

réalité permet d'imaginer de nouveaux types de services pour les acteurs de l'Internet Physique.

Nous avons présenté ici, sur la base d'un exemple simple, les possibilités d'utilisation de ce modèle pour une aide au déchargement. Ce type d'application potentielle est directement basé sur les informations spatiales du modèle généré. D'autres applications de même type pourraient être imaginées comme par exemple le contrôle de complétude, le rechargement partiel après déchargement d'une partie des PI-conteneurs, la détection d'écrasement, etc. Mais ces informations spatiales peuvent également être utilisées pour la surveillance de grandeurs physiques de nature différentes (température, humidité, vibrations, etc.) dans des situations où il est important de pouvoir contrôler celles-ci (agroalimentaire par exemple).

Ces pistes, ainsi que le développement d'outils efficaces en temps de calcul pour l'obtention du modèle 3D, constituent pour nous des travaux à développer pour le futur.

and Multi-agent Manufacturing, Springer International, Vol. 594, 259-269.

Zhang H., Y. Chai, S. Tu, Z. Chen (2009): A Container Management System Based on WSN and RFID. *Computer Engineering*, 35(1), 245-246.

7 REFERENCES

- Ballot E., B. Montreuil, R.D. Meller (2014): The Physical Internet: the network of the logistics networks. *La Documentation Française*. Paris.
- Ballot E. (2012): L'Internet physique : appliquer les principes d'Internet à la logistique (interact.net)
- Bortfeldt A., G. Wäscher (2012): Container loading problems - a state-of-the-art review. Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Working Paper No. 7/2012.
- Dittmer P., M. Veigt, B. Scholz-Reiter, N. Heidmann, S. Paul (2012): The intelligent container as a part of the Internet of Things. *IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems*, 209-214, 27-31 May.
- Heurtefeux K., F. Valois (2012) : De la pertinence du RSSI pour la localisation dans les réseaux de capteurs. AlgoTel, May 2012, La Grande Motte, France.
- Hsiao B.R., H.H. Chen, W.J. Liao, T.C. Chiu, C.C. Nien (2014): Sensor connectivity enhancement using diversity antennas in cold chain logistic applications. *In International Symposium on Antennas and Propagation*, 281-282, 2-5 Dec.
- Kim S.J., G. Deng, S.K.S. Gupta, M. Murphy-Hoye (2008): Intelligent networked containers for enhancing global supply chain security and enabling new commercial value, *3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops*, 662-669, 6-10 Jan.
- Lang W., R. Jedermann, D. Mrugala, A. Jabbari, B. Krieg-Bruckner, K. Schill (2011): The Intelligent Container -A Cognitive Sensor Network for Transport Management, *IEEE Sensors Journal*, 11(3), 688-698.
- Meller R.D., Y.H. Lin, K.P. Ellis (2012): The Impact of Standardized Metric Physical Internet Containers on the Shipping Volume of Manufacturers, *Proceedings of 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Bucharest, Romania, 364-371.
- (Modulushca, 2015): <http://www.modulushca.eu/>, 2015.
- Montreuil B., Ballot E., Tremblay W. (2015): Modular Design of Physical Internet Containers, *Progress in Material Handling Research*, Vol. 13, MHI, To appear.
- Sallez Y., B. Montreuil, E. Ballot (2015): On the Activeness of Physical Internet Containers, *Service Orientation in Holonic*