Effect of the river bed degradation on the vulnerability of river banks to landslides

Sambath KY[1], Juan MARTINEZ[2], Soksan CHHUN[3]

[1]*Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Laboratoire GCGM, 20, avenue des Buttes de Coësmes – CS 70839 – 35708 RENNES, France, email : sambath.ky@insa-rennes.fr*

[2]*Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Laboratoire GCGM, email : Juan.Martinez@insa-rennes.fr*

[3]*Institut de Technologie du Cambodge, Départment GCI, email : soksanchhun@yahoo.com*

RÉSUMÉ. *La dégradation du lit de la rivière et l'instabilité des berges ont augmenté dernièrement le long du bas Mékong. Cela est la conséquence de l'extraction de matériaux de la rivière et peut être de la construction de barrages hydro-électriques en amont. L'hypothèse d'une surface de rupture plane dans le lit de la rivière permet de simuler la dégradation de celui-ci et de calculer des facteurs de sécurité locaux (SF_{min}). Le calcul de la stabilité des berges est ensuite mené à l'aide de la méthode d'équilibre limite des tranches. Le niveau de la nappe phréatique dans la berge est déterminé par la méthode de Dupuit avec l'hypothèse d'un écoulement uni-directionnel, ce qui permet de déterminer les pressions intersticielles dans le sol. Les résultats montrent que les facteurs de sécurité locaux (SF_{min}) augmentent avec la distance au pied de la berge et diminuent avec la profondeur de la rivière. Le lit critique est celui qui produit un facteur de sécurité locale (SF_{min}) égale au facteur de sécurité global ($SF_{min}(X_0)$) et l'angle correspondant β_{cr} est un angle critique. Ce paramètre est utile pour évaluer le risque de projets tels que la protection des berges et l'extraction de sable.*

ABSTRACT. *The river bed degradation and the river bank instability have increased recently along the Lower Mekong River. This is the consequence of the channel bed extraction and may be of the construction of upstream hydroelectric dams. By making first the assumption of a mass failure along a plane slip surface within the material of the river bed, we can simulate the degradation of the bed and calculate local Safety Factors (SF_{min}). The calculation of the bank stability is then performed by the limit equilibrium method of slices. The water table is determined using the Dupuit assumption of a unidirectional flow which allows to determine the pore water pressure in the soil. The results demonstrate that the local safety factors (SF_{min}) increase with the increasing distance to the bank toe and decrease with the increase of the river bed depth. The critical bed is the one that produces a local safety factor (SF_{min}) equal to the global safety factor ($SF_{min}(X_0)$) and the corresponding angle β_{cr} is a critical angle. This parameter is useful for determining the risk assessment of projects such as river bed protection and sand mining.*

MOTS-CLÉS : *Bas Mékong, érosion du lit, facteur de sécurité, lit critique.*

KEY WORDS: *Lower Mekong, bed degradation, safety factor, critical bed.*

1. Introduction

River banks can be submitted to landslides, causing property damage such as the collapse of structures, houses and human victims. This is the case along the Lower Mekong River. There are several triggering factors to river bank mass landslides and most of them are from the fluvial geomorphological process, which induces dynamic and constant changes in both space and time. For instance, scouring and erosion are significant at outer of the meander which creates a cut bank. On the other hand, the sediment deposition is significant at the opposite place where is created a point bar (Figure 1). Both are the result of centrifugal forces of the flow at meanders of the river. One important triggering factor is the difference between the river water level and the groundwater table that also makes significant changes in safety factor of a river bank mass landslide [CHH 15]. Human activities must also be taken into account as triggering factors of river bank stability but the uncertainty of the parameter remains high. The present research work aims to quantify the risk of landslide of the Lower Mekong by analyzing the riverbank stability under the effect of river bed degradation as occurring in the Mekong basin for the recent years.

Mekong River provides sediments such as sand, silt and gravel for the construction of infrastructures that are important in developing countries as Laos, Thailand, Cambodia and Vietnam for their economic growth. However the channel bed extraction has a strong impact on the river dynamics system such as negative ecological consequences (variation of the river water level, deviation of flow ratio to various water curses, bank erosion etc…) and is a non-sustainable operation [BRA 13a]. On the other hand there are also positive impacts such as the flood damage reduction and the navigation improvement [BRA 13a]. The economic demand for sand silt and gravel for developing the construction has triggered a large-scale extraction of sediments from the Mekong River, main stream between Laos, Thailand, Cambodia and Vietnam in 2011 that represents a volume of 34.48 million cubic meters per year. In addition, the impacts of hydroelectric dams which recently increased along Mekong River change the concentration of suspended sediment from upstream-downstream of the dams [BRA 13b] and modifies the delta morphology channel significantly. For instance, the analysis of the channel of the two main distributaries of 250 km long deltaic of Mekong and Bassac from the Cambodian border to the coast comparing data for 1998 and 2008, shows that there are a significant and irregular bed variation which is increased in mean depth by more than 1.3m. The channel also shows the important incision, expansion and deepening of numerous pools [BRU 14]. There is also a report showing that the coastal surface of Mekong delta suspended sediment has significant decreased from the Mekong river in recent years [ANT 15].

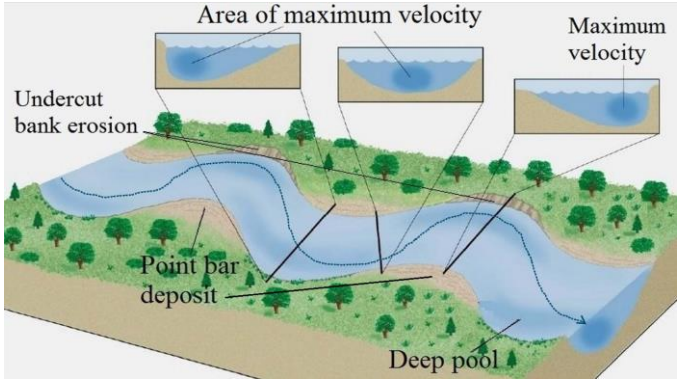


Figure 1. *General situation of river banks at the meander of a river*

2. Site investigation

2.1 Geotechnical investigation

Geotechnical tests were conducted along Bassac River in Kandal Province close to the Phnom Penh city of Cambodia, as indicated in Figure 2. A Standard Penetration Test (SPT) and laboratory soil tests were performed and soil classification was made based on USCS (Unified soil classification system) criteria. The mechanical parameters obtained from the soil testing are summarized in Table 1. Three cross sections of the river shown in Figure 3 were measured, on May 2015 by Eco-sounding with GPS (global positioning system) and the upper bank coordinates were measured on October 2015 by a Total Station.

2.2 River water level condition

The river bank location is close to the Chaktomuk hydrology station of Ministry of water resources and meteorology of Cambodia which data are shown in Figure 4 [MIN 14]. According to the hydrological graph we can make different scenarios to get different values of the Safety Factor (SF_{min}) dependent on its flood level and drawdown speed [CHH 15]. In this paper the research aim is the effect of the river bed degradation to the bank stability, so the calculations concern with the water level fluctuation are performed only in one scenario: the mean value of the hydrograph that represents the highest probability but not necessary the more conservative case. We see that the mean water level (WL) from 1991 to 2014, fluctuated from +2 m to +9.5 m so we select both the initial river WL and groundwater table at +6 m, close to the mean value. The total simulating time that we consider is 5.5 months. Firstly from the initial value than the river WL increases to +9.5 m (maximum mean water level) in 2.5 months and then the river WL decreases to +4 m in 3 months as shown in Figure 4 (brown arrow lines).

Table 1. *Summary of geotechnical test results.*

Item	*Layer1 (CL)*	*Layer2 (OL)*	*Layer3 (ML)*	*Layer4 (ML)*
Depth (m)	0 - 6	6 -10.5	10.5 -15	15 -…
Water content W (%)	31.1	42.7	20.1	16.3
Wet unit weight γ_h (kN/m^3)	15.1	14.8	15.6	18
Dry unit weight γ_d (kN/m^3)	11.5	10.3	13	15.5
Specific gravity Gs (kN/m^3)	26.5	25.5	26.3	26.5
Porosity n_0	0.566	0.595	0.507	0.417
Hydraulic conductivity k (m/s)	1×10^{-7}	1×10^{-7}	1×10^{-6}	1×10^{-6}
Drained cohesion c' (kN/m^2)	27.3	18.9	12.3	5
Friction angle φ' (deg)	15	8.5	23.5	25
Grain diameter d_{50} (mm)	< 0.075	< 0.075	0.15	0.2
SPT N value	3-4	2-3	4-12	24-32

Figure 2. *Locations of the study sites (blue arrows indicate the river flow direction, green pin is a borehole for geotechnical test, orange lines are cross sections showing the geometry of the bank).*

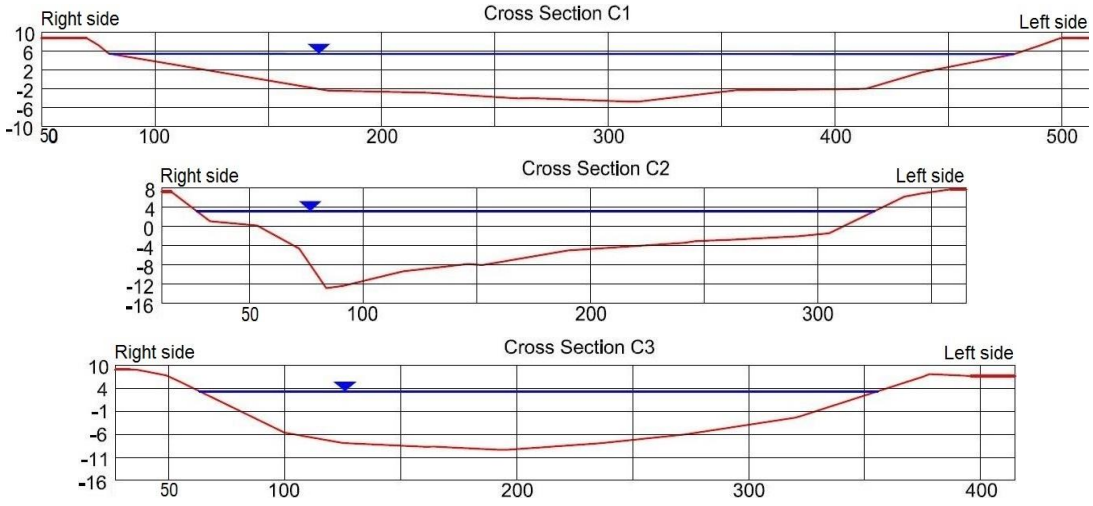


Figure 3. *Cross Section at locations C1, C2 and C3 (Coordinates are given in m).*

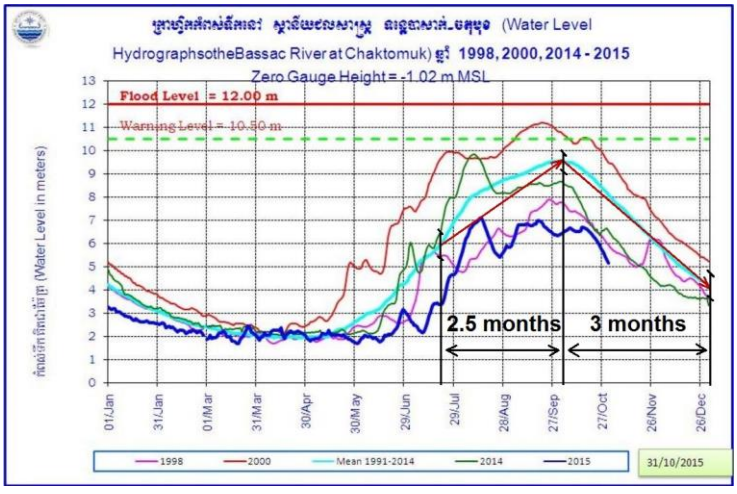


Figure 4. *Water Level Hydrograph Bassac River at Chaktomuk station taken from http://www.dhrw-cam.org*

3. Methodology of finding critical depth to river bank mass landslide

The type of mass failure of river banks are strictly associated with bank material composition, for example, the rotational slip failure tends to occur in cohesive banks while the shallow slip and plane slip failure tend to occur in non-cohesion materials, as shown in Figure 5 [HAI 12].

In this research, in order to evaluate the safety of mass failure of river banks, the slope stability by the limit equilibrium slices method with circular rotational slip surfaces is used to calculate the Safety Factor (SF) seen in Figure 6 a,b and equation 1. The seepage analysis is modeled by considering a plane flow network orthogonal to the river direction with parallel potential lines obeying to Dupuit assumption [REZ 99] and governed by equation 2 which leads to a hydrostatic pore pressure field. The coupled calculation between seepage and slope stability is performed by a unique code MEStab written in Matlab language [CHH 13a,b], [KY 14]. In the following simulations, the erosion phenomenon and the unsaturation of soil are not considered.

$$SF = \frac{\sum (C' + N' \tan \varphi')}{\sum [(W + P\cos\beta)\sin\alpha - P\sin\beta\cos\alpha]} \qquad [1]$$

In equation 1, $C'=c' \times B$, c' and φ' are the effective soil cohesion and friction angle respectively, N' is the effective normal force on the bottom of the slice, W is the slice weight, P is the resultant of the external water pressure at the top surface of the slice, α and β are geometrical angles (Figure 6 a,b).

$$\frac{\partial H(X,t)}{\partial t} = \frac{k_0}{2n_0} \frac{\partial^2 H^2(X,t)}{\partial^2 X^2} \qquad [2]$$

In equation 2, $H(X, t)$ is the hydraulic head, X and t are the space and time variables respectively, k_o and n_o are the permeability and the porosity of the soil respectively.

According to the slope stability calculation, we can find out the most likely rupture surface which has the smallest value of Safety Factor for the whole bank profile; this value is named the global safety factor $SF_{min}(X_0)$, and the corresponding surface is called the critical surface, X_0 being the abscissa of the toe of the critical surface (Figure 7). If we impose the slip surfaces to pass by a given point (with toe abscissa X_i), different from X_0, we can calculate the minimum value of the Safety Factor $SF_{min}(X_i)$ from slip surfaces passing at point X_i. Obviously $SF_{min}(X_i) > SF_{min}(X_0)$ and is called a local Safety Factor.

By the assumption that the river bed material is low-cohesive sand and silt, which mass failure occurs along plane slip surfaces, we can create a plane surface (angle β) below the original bed for simulating its degradation (Figure 8). This surface is first connected to the critical surface toe (X_0), in order to conserve the global value $SF_{min}(X_0)$ and to compare it to the new values $SF_{min}(X_i)$. So for the points of abscissa $X_i > X_0$ the initial values $SF_{min}(X_i)$ are conserved and the new local Safety Factor $SF_{min}(X_i)$ must be calculated only for $X_i < X_0$. This method considers that the initial failure surface at $X_i > X_0$ is not affected by the bed degradation, if it is the case, a new X_0 must be reconsidered. The critical virtual river bed is thus the one that produces a local safety factor $SF_{min}(X_i) = SF_{min}(X_0)$ and the corresponding angle β_{cr} is a critical angle that cannot be exceeded by human activities (sand mining) in order to preserve the bank global stability.

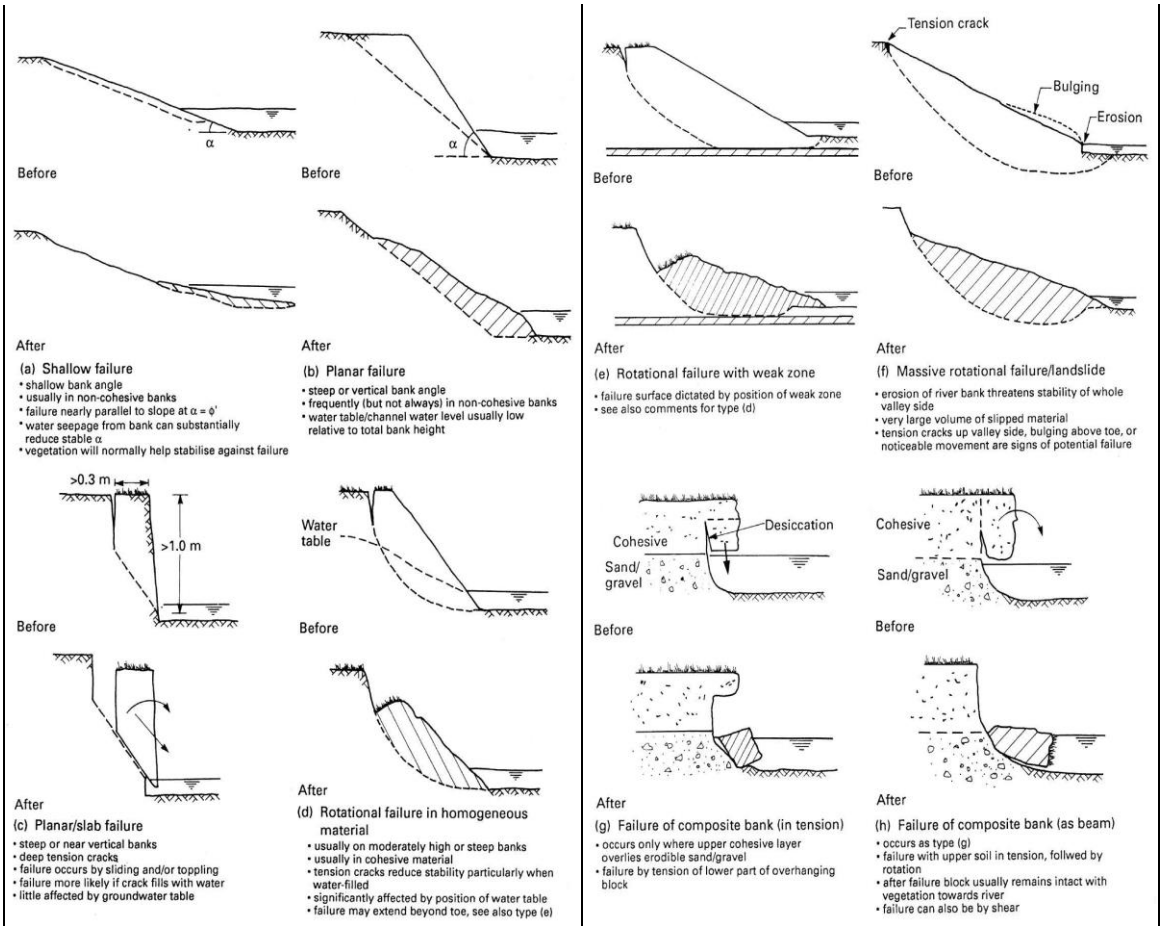


Figure 5. *Types of mass failure of banks [HAI 12]. (Original from Hemphil and Bramley, 1989)*

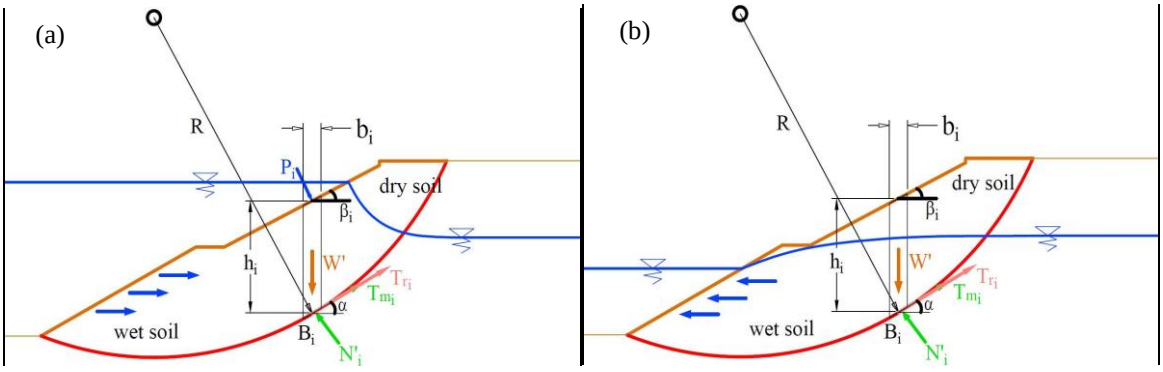


Figure 6. *Free body diagram of slip surface and slice with no inter-slice forces (Fellenius method). (a) high river water level situation and (b) low river water level situation (blue arrows indicate flow direction)*

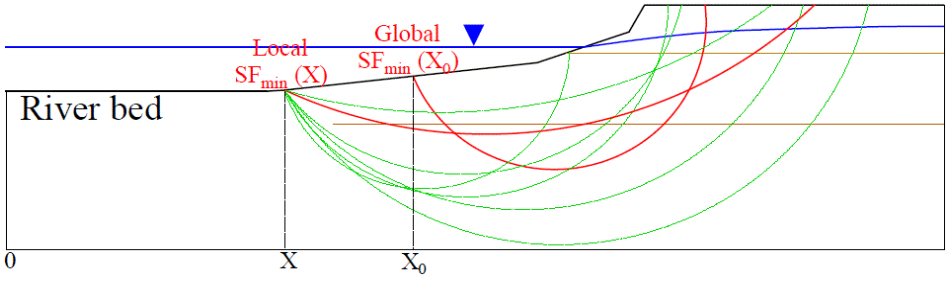


Figure 7. *Global $SF_{min}(X_0)$ and local $SF_{min}(X_i)$ minimum Safety Factors definition.*

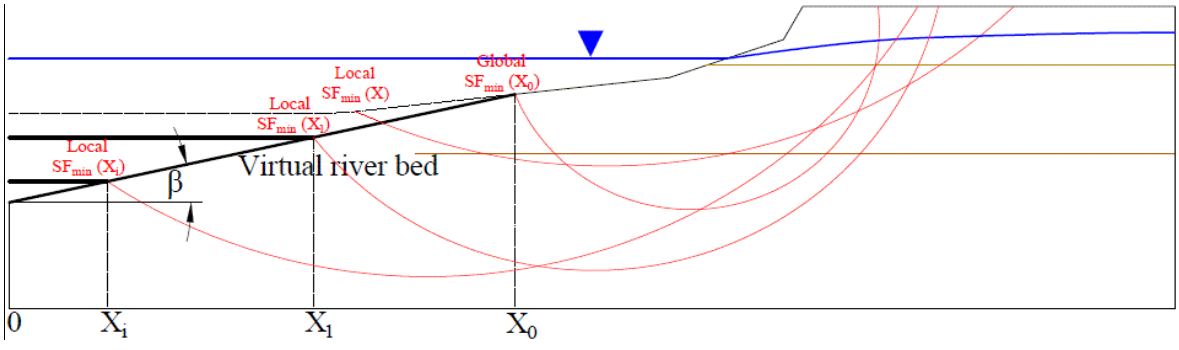


Figure 8. *Virtual river bed (thick black line) and local SF_{min} (X_i) along the virtual river bed.*

4. Analysis of results and discussion

The river bank stability is calculated with the mechanical soil properties from table 1 along a cross section C2 of the left bank of the river (Figure 3), with criteria of river WL fluctuation as indicated in Figure 4. The results of seepage and slope stability analysis when the river WL reaches +4 m corresponding to a minimum value for the global Safety Factor, are shown in Figure 9, where the groundwater table is drawn in blue curve line, the global safety factor $SF_{min}(X_0)$ is noted as SF_0 and the critical surface is drawn in red circles. As indicated previously, the minimum safety factor occurs after the drawdown of the river water level; its value ($SF_{min}(X_0)$ = 1,268), greater than one, is consistent with the present bank profile.

We now apply the above methodology for finding the critical angle β_{cr} of the damaged bed. For this purpose we consider different values of $X_i < X_0$ distant from 20 m. The plot of all the local $SF_{min}(X_i)$ passing through each discrete point X_i of the virtual river bed are shown in Figure 10.

The results show that:

1. The local $SF_{min}(X_i)$ values increase as the points get away from the critical surface toe X_0 and decrease with the increasing river bed depth and with the increase of β angle.

2. At β_5 = 46.1° we get the following values of $SF_{min}(X_i)$: SF_B = 1.267 = SF_0 ; SF_C =1.286 ≈ SF_0 ; SF_D =1.215 ≈ SF_0 and SF_E = 1.121 ≈ SF_0. If we accept the approximations that the above values are close enough to the global safety factor value (SF_0 = 1.268), the line A to E can be considered as the critical virtual river bed and $\beta_{cr} = \beta_5$. Obviously, a better precision could be obtained by reducing the intervals of β and X_i values.

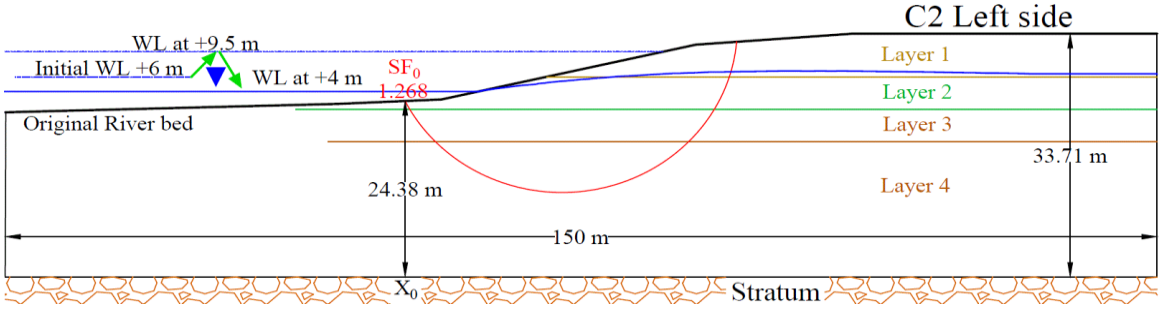


Figure 9. *Result of the stability of the river bank at the left side of cross section 2.*

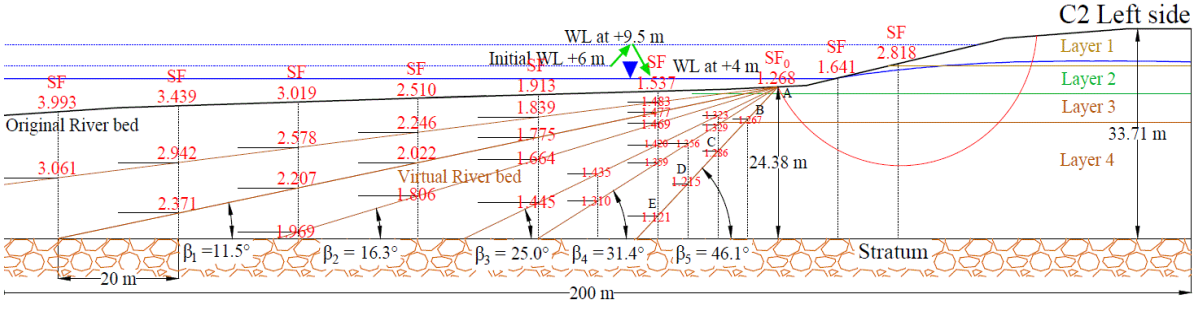


Figure 10. *Results of local safety factors $SF_{min}(X_i)$ and critical angle β_{cr} of river bed (cross section 2).*

5. General conclusions and future work

In this paper, a procedure based on the concept of the Safety Factor derived from limit equilibrium methods, is used to evaluate the River bank stability when the river bed is submitted to natural or human degradation, and is applied it to a case study located at the Bassac River near PhnomPenh city, Cambodia. The calculation uses the geotechnical properties of the soil, the profile of the cross section and the data of local hydrology giving the river Water Level fluctuation. Furthermore, a methodology for finding the acceptable critical angle of the degraded river bed is proposed using the assumption of the degradation along a shallow and plane slip surface. By imposing the toe of the bank circular slip surface to pass through arbitrary points of abscissa X_i, a set of local Safety Factors $SF_{min}(X_i)$ are determined and compared to the initial global Safety Factor before degradation $SF_{min}(X_0)$. By assuming $SF_{min}(X_i) = SF_{min}(X_0)$ the value of the river bed critical angle β_{cr} is determined. This original methodology is useful for the monitoring of river bed degradation as for example due to sand mining as it gives the geometry of the limit zone where the mining does not affect the river bank stability.

Future work will concentrate on considering non planar slip surfaces of the river bed and their possible interaction with the initial slip surface of the river bank. Moreover, the effect of natural erosion of the banks combined with human degradation will also be taken into account in order to simulate more on site realistic situations.

References

[ANT 15] ANTHONY E. J., BRUNIER G., BESSET M., GOICHOT M., DUSSOUILLEZ P., NGUYEN V. L., « Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities », *Scientific Reports* 5, Article number 14745, October 2015, DOI: 10.1038/srep14745.

[BRA 13a] BRAVARD J. P., GOICHOT M., GAILLOT S., « Geography of Sand and Gravel Mining in the Lower Mekong River », *EchoGéo [En ligne]*, 26 | 2013, mis en ligne le 19 décembre 2013, http://echogeo.revues.org/13659; DOI : 10.4000/echogeo.13659.

[BRA 13b] BRAVARD J. P., GOICHOT M., TRONCHÈRE H., « An assessment of sediment-transport processes in the Lower Mekong River based on deposit grain sizes, the CM technique and flow-energy data », *Geomorphology*, vol. 207, 2013, p. 174-189. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.11.004

[BRU 14] BRUNIER G., ANTHONY E., GOICHOT M., PROVANSAL M., DUSSOUILLEZ P., « Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta : The marked impact of river-bed ming and implications for delta destabilization », *Geomorphology*, vol. 224, 2014, p. 177-191.

[CHH 13a] CHHUN S., Etude de la stabilité des berges de rivière soumises à la marée, Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 2013.

[CHH 13b] CHHUN S., MARTINEZ J., DUPONT P., AND HUYNH T. S., « Simplified method of analysis of the stability of river banks subjected to tide variation », *Proc. of the 5th Int. Young Geotechnical Eng. Conf. 5iYGEC*, Paris, 2013.

[CHH 15] CHHUN S., KY S., MARTINEZ J., HUYNH T. S., « Prediction of mass landslides of river banks subjected to variations of the water level », *GMSARN International Journal*, vol. 9, 2015, p. 113-118.

[DAR 07] DARBY S. E., RINALDI M., AND DAPPORTO S., « Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks », *J. Geophys. Res*, 112, 2007.

[HAI 12] HAI Q.T., Bank Erosion Processes along the Lower Mekong River, PhD thesis, University of Southampton, 2012.

[HUA 14] HUANG Y. H., *Slope Stability Analysis by the Limit Equilibrium Method*, US., ASCE Press, 2014.

[KY 14] KY S., Stabilité des berges de rivière soumises à la variation du niveau d'eau : étude numérique paramétrique, Mémoire de Master, INSA de Rennes, 2014.

[MIN 14] Ministry of Water Resources and Meteorology of Cambodia, Flood information: Hydrograph. Retrieved April 2014 from the World Wide Web: http://www.dhrw-cam.org/hydrograph.php?action= image&hy_cat_id=&hydroid=69

[MRC 09] MEKONG RIVER COMMISSION, The Flow of the Mekong, Mekong River Commission Management Information booklet series, report, November 2009.

[REZ 99] REZZOUG A., ALEXIS A. AND THOMAS P., « Ecoulement à surface libre dans un massif de sol soumis à la marée : comparaison théorie-expérimentation », *Can. Geotech. J.*, vol. 36, 1999, p. 13-20.

[RIN 08] RINALDI M., MENGONI B., LUPPI L., DARBY S. E. AND MOSSELMAN E., « Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend », *Water Resour. Res.*, 44, 2008.

[SIM 10] SIMON A., BANKHEAD N. AND THOMAS R., « Iterative bank-stability and toe-erosion modeling for predicting stream bank loading rates and potential load reductions », *2nd Joint Federal Interagency Conference*, Las Vegas, 2010.

Comportement sismique des maçonneries non armées : de la campagne expérimentale à la modélisation numérique

Christophe Mordant[1], Vincent Denoël[2], Hervé Degée[3]

[1] *Université de Liège, Département ArGEnCo, Place du XX août 7, 4000 Liège, Belgique, cmordant@ulg.ac.be*

[2] *Université de Liège, Département ArGEnCo, Place du XX août 7, 4000 Liège, Belgique, v.denoel@ulg.ac.be*

[3] *Universiteït Hasselt, Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen, Agoralaan, Building D, 3590 Diepenbeek, België, herve.degee@uhasselt.be*

RÉSUMÉ. *La présente contribution décrit trois campagnes expérimentales visant à améliorer la compréhension du comportement des maçonneries portantes non armées sous action sismique. Au cours de ces campagnes, des essais cycliques et sur table à secousses ont été réalisés sur des murs simples ou présentant un détail constructif particulier (ouverture, mur perpendiculaire ou présence de joints en caoutchouc en pied et tête de mur pour des raisons acoustiques). Les murs testés, leur instrumentation et le déroulement des essais sont tout d'abord décrits. Ensuite, les principaux résultats expérimentaux sont fournis. Seuls les résultats utiles pour la modélisation numérique des murs étudiés sont repris ici. Parmi ces derniers, les propriétés mécaniques (modules d'élasticité et de cisaillement) et les courbes « force-déplacement » sont de première importance. Enfin, les murs sont modélisés à l'aide du logiciel TREMURI et les prédictions numériques obtenues sont comparées aux résultats expérimentaux. Cette comparaison montre qu'une modélisation de la maçonnerie à l'échelle « macro » prédit correctement le mode de ruine permet de reproduire le comportement global des murs de manière satisfaisante.*

ABSTRACT. *The present contribution describes three experimental campaigns aiming at improving the understanding of the seismic behaviour of unreinforced load-bearing masonry structures. The campaigns considered in this paper consisted in static cyclic and shake table tests on simple unreinforced masonry walls with some of them including specific details as, for instance, an opening, a perpendicular wall or rubber layers at their bottom and top for acoustic reasons. First, the tested walls are described with their instrumentation and test sequence. The main experimental results are then provided. This information is expressed in terms of mechanical properties and force-displacement curves. Finally, the walls are modelled in the software TREMURI and the numerical predictions are compared to the experimental measurements. This comparison shows that a modelling at the macro-scale predicts the right failure mode and provides results in good agreements with the global behaviour of the walls.*

MOTS-CLÉS : *maçonnerie non armée, essais cycliques, table à secousses, modélisation.*

KEY WORDS: *unreinforced masonry, cyclic tests, shake table tests, numerical model.*

1. Introduction

La maçonnerie est, de loin et historiquement, le matériau le plus utilisé comme système structurel pour les logements en Europe de l'Ouest, comme en Angleterre [DEP 10] et, plus particulièrement, en Belgique. Depuis la crise énergétique de 1973, la maison en maçonnerie a connu diverses évolutions et modifications afin de répondre aux exigences croissantes en termes de confort individuel et de performances physiques du bâtiment. Il est aujourd'hui question de « maison passive » [PAS 15]. En Belgique, ces exigences ont conduit à construire des maisons dont les murs ne sont plus monolithiques, mais constitués d'un mur porteur d'épaisseur réduite (15-20 cm) combiné à un mur de façade distinct et entre lesquels un matériau isolant est placé (voir Figure 1 (a)). Afin de respecter les niveaux d'exigence actuels, des détails constructifs supplémentaires ont dû être développés et consistent à réaliser le premier lit de blocs avec un matériau hautement isolant, comme des blocs en béton cellulaire (Y-tong). Cette solution est illustrée à la Figure 1 (b).

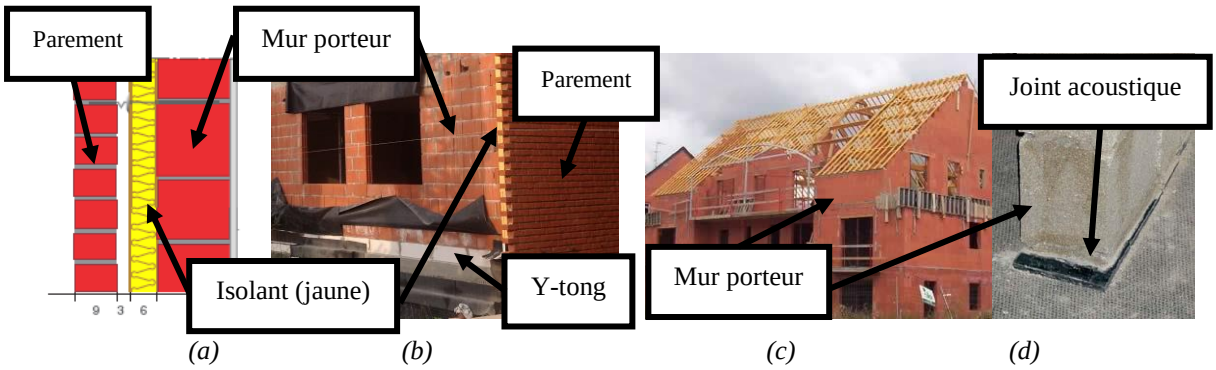


Figure 1. *Evolution des structures en maçonnerie non armée et nouvelles applications.*

Outre les aspects thermiques, la maçonnerie n'est plus uniquement utilisée comme système structurel dans les maisons unifamiliales. En effet, des immeubles à appartements de 5 ou 6 étages sont de nos jours construits en maçonnerie non armée portante (Figure 1 (c)), sans aucune forme de renforcement. Ce nouveau domaine d'application a pour conséquence d'augmenter le niveau de compression de la maçonnerie vu l'augmentation de la hauteur et de la masse inhérente. Ce niveau est dès lors plus proche de la limite de résistance. L'immeuble étant occupé par plusieurs ménages, des exigences en termes d'acoustique sont également requises. Afin d'assurer une insonorisation suffisante, des couches de caoutchouc sont, par exemple, placées en pied et tête de mur (Figure 1 (d)).

Depuis 2011, la conception parasismique des bâtiments est obligatoire en Europe et ses principes sont repris dans la norme européenne Eurocode 8 [EC8 04]. Cependant, des études [KAR 09, DEG 07] ont montré que ces règles conduisent à un niveau de sécurité très, voire trop, élevé lorsque la zone considérée est de sismicité faible à modérée, comme en Belgique. De plus, ces règles ne sont pas adaptées aux méthodes de construction traditionnelles, rendant les solutions structurelles en maçonnerie non armée économiquement peu compétitives. Enfin, les normes actuelles n'intègrent pas les dernières solutions constructives décrites ci-avant. Par conséquent, il est nécessaire de réviser les règles visant à assurer la stabilité des constructions sous action sismique.

Afin de contribuer à cette révision, deux campagnes expérimentales ont été réalisées en 2011 à l'Université de Liège. Ces campagnes avaient pour but d'améliorer la compréhension du comportement sismique de murs en maçonnerie non armée moderne (joints horizontaux minces avec système de tenon-mortaise pour les joints verticaux) à l'aide d'essais cycliques. L'influence des nouvelles solutions constructives, d'une ouverture dans le mur ou de la présence d'un mur perpendiculaire à l'action sismique a également été étudiée. Le comportement de chacune de ces variantes a été comparé à la réponse d'un mur simple. D'autres essais ont lieu à la même période [COS 11, POR 10, SOU 14], mais portent sur des types d'appareillage différents. Parmi ceux-ci, peu se sont intéressés aux nouvelles dispositions constructives [MAR 14].

Cet article résume les deux campagnes expérimentales réalisée à Liège sur de la maçonnerie non armée moderne avec des blocs en terre cuite. Il décrit tout d'abord les murs testés, leur instrumentation et le déroulement des essais. Les résultats principaux sont ensuite fournis et exprimés en termes de mode de ruine, de courbes « force-déplacement » et de propriétés mécaniques. Enfin, les murs sont modélisés à l'aide du logiciel TREMURI [LAG 13] afin de comparer les prédictions numériques aux résultats expérimentaux.

2. Description des murs testés et de la procédure d'essai

7 murs ont été testés au cours de deux campagnes expérimentales. D'une part, 4 murs (A1-4), de mêmes dimensions globales (3.00m de long, 2.80 m de haut et 0.14 m d'épaisseur), avaient une section rectangulaire. Le mur A1 était un simple mur sans détails particuliers. Au contraire, les murs A2 et A3-4 possédaient respectivement une bande de caoutchouc d'1 cm d'épaisseur à sa base et à sa tête ou une ouverture de 2.00 m de haut sur 0.90 m de largeur, créant une asymétrie dans le plan du mur. La différence entre ces derniers murs résidait dans la longueur de support du linteau, à savoir 0.15 m (A3) et 0.45 m (A4). Ces murs ont été soumis à une niveau de compression de 1.00 MPa, à l'exception du mur avec dispositifs en caoutchouc (0.50 MPa). D'autres part, 3 murs identiques de 2.50 m de long, 2.80 m de haut et 0.15 m d'épaisseur était chacun collé perpendiculaire à un mur (1.50 m x 2.80 m x 0.15 m). Le premier est appelé « *mur de cisaillement* » et le second, « *semelle* ». Ces murs (C1-3) ont été soumis à différents niveaux de compression (0.75, 1.00 et 1.25 MPa). Les propriétés mécaniques des 7 murs sont données au Tableau 1.

L'instrumentation mise en place pour les deux ensembles de murs est illustrée à la Figure 2. Pour les spécimens A1-4, le déplacement horizontal H_{sup}, le déplacement vertical en deux points (V_1, V_2) et la rotation *Rot* de la poutre supérieure ont été mesurés. Le déplacement de la poutre inférieure H_{inf} a également été enregistré, de même que celui au niveau du sommet de l'ouverture (H_{int}) lorsqu'il y en avait une. Des capteurs supplémentaires ont été installés pour les spécimens C1-3 : déplacement vertical de la poutre supérieur ($V_{m,g}$, $V_{m,d}$) et le déplacement des coins supérieurs du mur de cisaillement ($H_{w,1}$ et $H_{w,2}$). De plus, le comportement de la connexion entre les deux murs perpendiculaires a été étudiées à l'aide de quatre capteurs ($H/V_{j,1/2}$). Enfin, le déplacement horizontal à mi-hauteur de la semelle a été mesurée en trois points ($H_{g,m,d}$). La compression verticale et le cisaillement horizontal au niveau de la poutre supérieure ont également été mesurés à l'aide de 2 capteurs supplémentaires. Les murs ont été construits entre 2 poutres de béton armé représentant les planchers.

Tableau 1. *Propriétés mécaniques des murs.*

Mur		A1-4	C1-3
Résistance moyenne normalisée à la compression d'un bloc (EN 772-1 Annexe A)	[MPa]	13	15
Résistance caractéristique à la compression (NBN-EN 1996-1-1)	[MPa]	3.9	4.4
Résistance caractéristique initiale au cisaillement de la maçonnerie (NBN-EN 1996-1-1)	[MPa]	0.3	0.3
Valeur limite de la résistance caractéristique au cisaillement (NBN-EN 1996-1-1)	[MPa]	0.585	0.675

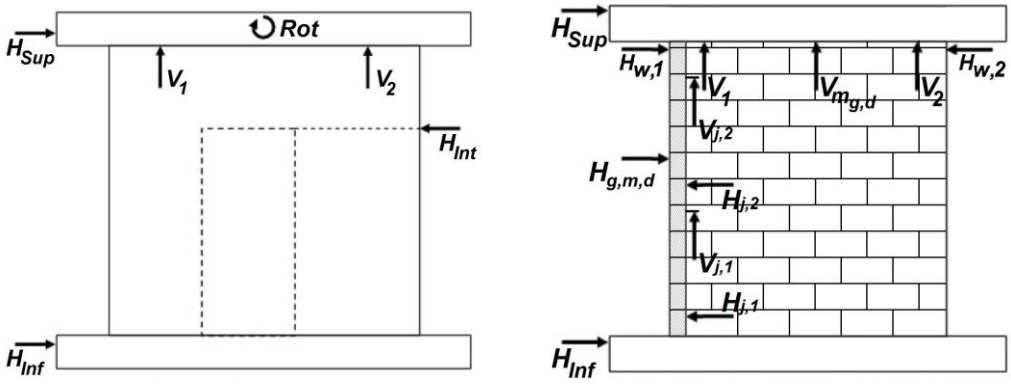


Figure 2. *Instrumentation des murs (murs A 1-4 à gauche ; murs C 1-3 à droite).*

Les campagnes se sont déroulés en 2 phases. La première était la mise en compression homogène des murs à l'aide de vérins hydrauliques. La seconde phase correspondait à l'essai cyclique quasi statique en tant que tel, avec contrôle du déplacement horizontal via un vérin hydraulique. Le niveau de déplacement fût augmenté tous les 3 cycles.

3. Résultats des campagnes expérimentales

Observer l'endommagement progressif des murs au cours des essais fournit des informations utiles pour apprécier le type de mode de ruine. La détérioration du mur sans dispositif particulier (A1) a produit des fissures diagonales et un écrasement des coins inférieurs du mur, typique d'un mode de ruine mélangeant cisaillement et flexion (voir Figure 3 (a)). La présence de dispositifs acoustiques (mur A2) a modifié ce mode de ruine. En effet, une fissure verticale a été initiée lors de la phase de compression du mur et est due à la présence des joints acoustiques. En effet, la déformation transversale du caoutchouc (effet Poisson) est plus importante que celle de la maçonnerie. Cette dernière est donc sollicitée en traction. Vu leur faible résistance en traction, les blocs se sont alors fissurés. Cette fissure s'est propagée dans le tiers supérieur du mur avant de devenir diagonale et de rejoindre les coins inférieurs (Figure 3 (b)). Concernant les deux murs avec une ouverture, la ruine du mur A3 est arrivée prématurément et provient de l'écrasement local de la maçonnerie sous les appuis du linteau (Figure 3 (c)). La prévention de cette ruine locale est assurée par une longueur d'appui plus importante. En effet, le mur A4 n'a pas développé ce type de ruine et a pu résister à un déplacement imposé plus important. Le mode de ruine de ce mur fut en cisaillement avec des fissures diagonales partant de la base du linteau, traduisant une ruine en cisaillement (Figure 3 (d)). Le mode de ruine des murs dont la section transversale formait un T (murs C1-3) est

illustrée à la Figure 3 (e) et montre une fissuration diagonale typique d'une ruine en cisaillement. La connexion entre les deux pans de murs perpendiculaires a été pleinement efficace et le joint n'a pas été endommagé.

(a) *(b)* *(c)* *(d)* *(e)*

Figure 3. *Mode de ruine des murs A1-4 (a-d) et des murs C1-3 (e).*

Le principal résultat caractérisant un essai cyclique est la courbe « force-déplacement ». A partir de celle-ci, il est possible de définir l'enveloppe de la réponse et de calculer une courbe bilinéaire élastique parfaitement plastique équivalente. Cette dernière est caractérisée par sa raideur initiale k_{ini}, son déplacement à la limite élastique d_y et sa ductilité μ. Elle est construite de la manière suivante : (i) définition de la raideur initiale comme la raideur sécante à 50 % de la force maximale, (ii) déplacement ultime pris égal au déplacement maximum de l'enveloppe et (iii) détermination de la limite élastique de sorte que l'aire sous la courbe bilinéaire soit égale à celle sous l'enveloppe. Ces courbes sont également illustrées à la Figure 4 pour les murs A1 et A2. Les informations fournies par la courbe bilinéaire sont présentées au Tableau 2 en termes de déplacement/force maximum et d'énergie dissipée.

Tableau 2. *Informations obtenues sur base des courbes « force-déplacement ».*

Mur		A1	A2	A3	A4	C1	C2	C3
Charge max. +	[kN]	129.2	75.3	71.6	76.5	110.6	142.0	162.0
Charge max. -	[kN]	121.5	74.4	75.4	75.7	124.7	154.4	168.4
Déviation max. +	[mm] / [%]	7.94/0.284	22.38/0.799	8.02/0.286	6.42/0229	8.09/0.289	6.11/0.218	5.01/0.179
Déviation max. -	[mm] / [%]	7.87/0.281	22.41/0.800	8.18/0.292	4.98/0.178	6.96/0.249	5.58/0.199	5.02/0.179
Energie dissipée	[Nm]	2517	15 759	1149	1288	9173	5173	4386

La comparaison des deux graphiques de la Figure 4 montre clairement l'influence des bandes de caoutchouc sur le comportement du mur de maçonnerie. En effet, sa présence donne lieu à des déplacements horizontaux plus grands sous de plus faibles charges horizontales. Ceci peut être expliqué par la flexibilité apportée par le caoutchouc. La présence des dispositifs acoustiques augmente également la dissipation d'énergie étant donné que le nombre plus élevé d'hystérésis et leur forme.

En termes de charge maximale, une légère différence est observée (5.96 %) pour le mur A1 alors qu'il est symétrique. En présence de caoutchouc, cette charge est réduite d'environ 40 %. La différence entre les directions positive et négative est cependant réduite. Pour les murs avec ouverture (A3-4), une réduction similaire est observée par rapport au mur A1. La charge maximale diffère plus entre les deux directions pour le mur A3 (5.04 %) que pour le mur A4 (1.05 %). La ruine prématurée des blocs situés directement sous le linteau explique cette différence. En effet, le signe + correspond à la surcompression de ces blocs qui ruine par écrasement. Lorsqu'il n'y a pas de ruine locale, le sens de sollicitation et la longueur du linteau influencent peu la charge maximale, vu la différence entre, respectivement, les deux sens de sollicitations du mur A4 (1.05 %) et les murs A3 et A4 dans le sens négatif (0.40 %). Les murs C1-3 montrent qu'une augmentation du niveau de compression induit une résistance latérale plus élevée. L'influence du mur perpendiculaire est également bien visible, vu la différence de résultats dans les deux directions (11.31 % pour C1). Cette différence est cependant réduite lorsque le niveau de compression augmente (3.80 % pour C3).

En termes de déplacement, la présence de caoutchouc triple les valeurs mesurées alors que la charge maximale est diminuée, ce qui confirme la réduction de raideur induite par ces dispositifs. L'asymétrie des murs A3-4 n'est remarquable que pour le mur A4, avec une différence relative de 13.97 % entre les deux sens. La ruine locale prématurée du mur A3 peut expliquer l'absence de différence pour ce dernier. Pour les murs C1-3, les résultats mènent aux mêmes conclusions que pour les charges, à savoir une augmentation de la raideur latérale et une influence plus faible du mur perpendiculaire lorsque le niveau de compression du mur augmente.

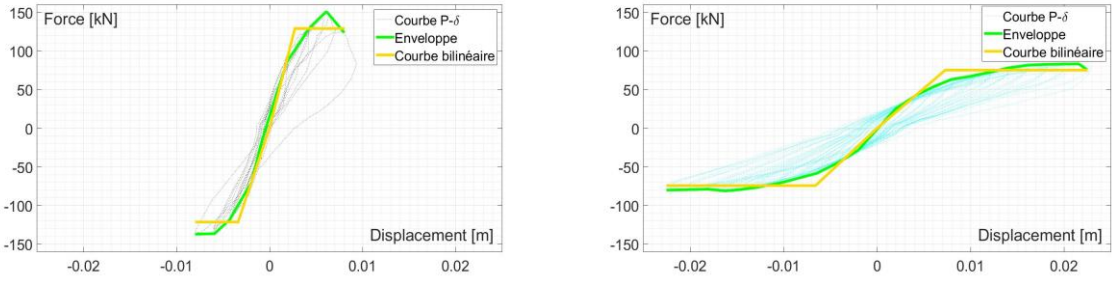


Figure 4. *Courbes « force-déplacement » des murs sans (A1) et avec (A2) caoutchouc*

Dans l'optique de modéliser les murs, leurs propriétés mécaniques constituent des données très utiles. Dans le cas présent, le module d'élasticité a été calculé sur base des mesures acquises durant la mise en compression des murs. Le module de cisaillement, quant à lui, est obtenu grâce aux données enregistrées durant l'essai cyclique. L'hypothèse d'un mur encastré en base et libre en tête a été faite pour calculer les valeurs données au Tableau 3. Deux remarques importantes sont à faire. D'une part, les modules sont des modules équivalents calculés dans l'optique d'une modélisation numérique à l'échelle « macro » des murs à l'aide d'éléments de poutres isotropes. D'autre part, ces valeurs ne permettent que de représenter correctement les premiers cycles de chargements à cause de la dégradation progressive des murs. Les grandes différences entre les murs A1-3 et A4, ainsi que celle entre le mur C1 et C2-3, ne peuvent s'expliquer que par la variabilité inhérente des procédés de fabrication de la maçonnerie, qui reste un matériau hétérogène, ou par la qualité du maçonnage.

Tableau 3. *Evaluation des propriétés mécaniques équivalentes des murs A1-4 et C1-3*

Mur		A1	A2	A3	A4	C1	C2	C3
Module d'élasticité	[MPa]	2464.7	2464.7	2425.9	3542.5	2773.6	3692.8	3662.5
Module de cisaillement	[MPa]	394.4	394.4	218.3	351.9	346.7	477.4	561.4

4. Modélisation numérique et comparaisons

Les résultats présentés dans cette section sont une extension du travail présenté lors de la conférence SECED 2015 [MOR 15b] où la version commerciale du programme TREMURI avait été utilisée pour la modélisation des murs décrits ci-dessus. TREMURI est un logiciel dédié aux structures en maçonnerie et développé à l'Université de Gênes. Le programme est un outil puissant qui modélise les structures par des portiques équivalent avec des éléments de type « poutre non linéaire », à l'échelle macro. La principale amélioration des derniers résultats obtenus réside dans l'utilisation d'une loi matérielle multilinéaire (Figure 5 (gauche)). En effet, la version commerciale ne permet que l'utilisation d'une loi bilinéaire. De plus, l'analyse effectuée pour cette contribution est une analyse cyclique avec contrôle du déplacement.

La méthodologie suivie pour obtenir les prédictions numériques fournies ci-dessous est la suivante. Partant des résultats expérimentaux relatifs au mur simple soumis à un essai cyclique (mur A1), les paramètres de la loi matérielle sont calibrés afin de faire correspondre les prédictions numériques à la courbe « force-déplacement » expérimentale. Une fois la correspondance satisfaisante, les paramètres déterminés sont utilisés pour la modélisation des autres murs constitués de la même sorte de bloc en terre cuite (murs A2-4). Un exemple du modèle défini pour les murs avec ouverture est donné à la Figure 5 (droite). Sur celle-ci, les parties de murs situées de part et d'autre de l'ouverture sont représentées par une poutre verticale, tandis que la maçonnerie située au-dessus de l'ouverture est modélisée par une poutre horizontale. Les différentes poutres sont connectées entre elles à l'aide de nœuds rigides. La même méthodologie a été appliquée pour les murs C1-3, mais n'est pas illustré dans cet article due à la limitation de longueur.

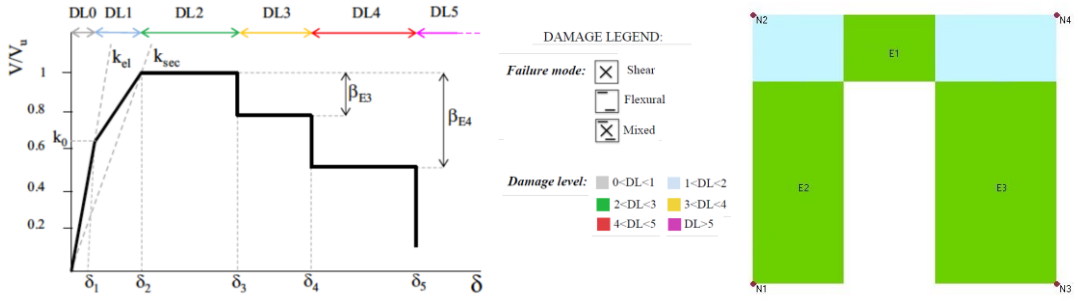


Figure 5. *Loi matérielle multilinéaire (gauche) et modèle pour mur avec ouverture (droite) dans TREMURI*

La Figure 6 compare les courbes « force-déplacement » expérimentale et prédite par le modèle numérique pour le mur simple sans détails particuliers (mur A1). Cette dernière a été fournie par TREMURI en considérant le module d'élasticité évalué sur base des résultats expérimentaux. Le module de cisaillement a dû être modifié afin que la raideur initiale du modèle soit en accord avec celle déduite des mesures expérimentales. Les principaux paramètres de la loi matérielle sont repris dans le Tableau 4. Les unités en vigueur sont celles du SI. Il faut également noter que le mode de ruine prédit par le modèle est similaire à celui observé au cours de la campagne d'essais, à savoir un mode combinant les ruines en cisaillement et en flexion. Les courbes expérimentale (en bleu) et théorique (en rouge) montrent une très bonne correspondance, hormis pour le comportement après ruine, localisé par le cercle noir sur la Figure 6.

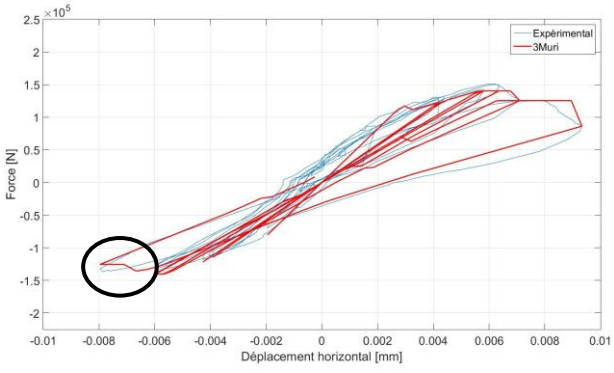


Figure 6. *Comparaison des courbes « force-déplacement » pour le mur A1*

Tableau 4. *Paramètres de la loi matérielle pour le mur A1.*

Paramètre	Module cisaillement	Résistance compr.	Résistance cisail. ini.	Résistance cisail. ult.	k_{el}/ks_{ec}
Valeur	540061166	3900000	300000	585000	1.400
Paramètre	δ_3 (flex./cisail.)	δ_4 (flex./cisail.)	δ_5 (flex./cisail.)	β_3 (flex./cisail.)	β_4 (flex./cisail.)
Valeur	0.000705/0.003150	0.000975/0.004250	0.003000/0.008000	0.705/0.825	0.365/0.825

La Figure 7 effectue la même comparaison que la Figure 6 pour le mur avec une ouverture (A3. Deux courbes sont présentes sur la Figure 7 (gauche) car des modifications de la loi matérielle ont été nécessaires pour améliorer la correspondance avec les mesures expérimentales. En effet, l'utilisation des paramètres définis au Tableau 4, tant pour les éléments représentants les parties verticales qu'horizontales du mur menait à la ruine de l'élément horizontal (en rouge), alors que cette partie du mur n'a pas été endommagée durant les essais. Cette problématique est bien connue [BEY 13] et a été résolue ici en multipliant par 10 les valeurs des paramètres δ_3, δ_4 et δ_5 pour le cisaillement de la loi affectée à l'élément horizontal du modèle afin de ne plus observer la ruine de cet élément (en vert). Une attention particulière est requise pour la modélisation des éléments horizontaux car leur comportement diffère des éléments verticaux. Ceci est cependant en dehors du sujet traité et la multiplication par 10 sert uniquement à éviter une ruine non pertinente au vu des observations et résultats expérimentaux.

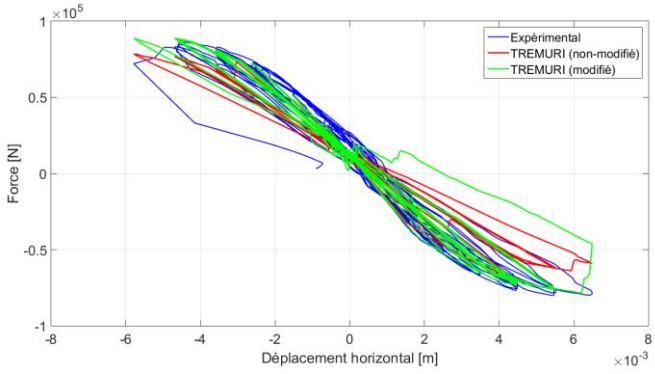


Figure 7. *Courbes « force-déplacement » (mur A4)*

Un travail similaire a été effectué pour le mur A2, incluant des bandes de caoutchouc. La reproduction des mesures expérimentales peut être accomplie en définissant un élément aux propriétés mécaniques équivalentes ou en modélisant les bandes de caoutchouc par des éléments de poutre connectés à l'élément représentant le mur de maçonnerie. Pour cette seconde solution, il est nécessaire de réduire de moitié la résistance à la compression de la maçonnerie. Dans cette configuration, la raideur du mur équivaut à 1/3 de celle du mur sans caoutchouc.

5. Conclusions

Cet article traite deux campagnes expérimentales sur des murs de maçonnerie moderne non armé dont les blocs sont en argile. Le but de ces campagnes est de mieux comprendre le comportement sismique de ce type de maçonnerie et d'étudier les effets sur ce comportement de solutions structurelles répondant aux exigences actuelles en termes de confort individuel et de performances physiques des bâtiments. Ces campagnes mettent en œuvre différents des essais cycliques quasi-statique visant à représenter l'action sismique. Suite à la description des murs testés et des principaux résultats expérimentaux, le logiciel TREMURI a servi à modéliser les murs étudiés afin de comparer les prédictions numériques aux résultats expérimentaux. Les conclusions qui en découlent sont les suivantes.

D'une part, le comportement global des murs simples est bien appréhendé par TREMURI. Les courbes « force-déplacement » expérimentales sont reproduites de manière pertinente grâce à la modélisation des murs à l'aide d'une loi matérielle multilinéaire.

D'autre part, la présence de bandes de caoutchouc pour des raisons acoustiques ou d'une ouverture modifie le comportement sismique du mur. Le premier augmente la déformabilité du mur, mais permet une meilleure dissipation d'énergie. Le second peut conduire à une ruine prématurée et locale de la structure si la longueur d'appui du linteau n'est pas suffisante. La modélisation de ces spécificités via un modèle « macro » fournit des résultats pertinents. Il est cependant nécessaire d'accorder une attention particulière aux éléments horizontaux.

6. Remerciements

C. Mordant souhaite remercier le F.R.S-F.N.R.S (Fonds belge pour la recherche) pour le financement de sa thèse de doctorat (boursier FRIA). Des remerciements particuliers sont également adressés à Sergio Lagomarsino et Serena Cattari pour l'aide fournie dans TEMURI.

7. Bibliographie

[BEY 13] BEYER C., MANGALATHU S., « Review of strength models for masonry spandrels », *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 11, 2013, p. 512-542.

[COS 11] COSTA A. A., PENNA A., MAGENES G., « Seismic performance of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Masonry: From Experimental Testing of the In-Plane Capacity of Walls to Building Response Simulation », *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 15, 2011, p. 1-31.

[POR 10] DA PORTO F., GUIDI G., GARBIN E., MODENA C., « In-Plane Behavior of Clay Masonry Walls: Experimental Testing and Finite-Element Modeling », *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, 2010, p. 1379-1392.

[DEG 11] DEGÉE H., DENOËL V., CANDEIAS P., CAMPOS COSTA A., COELHO E., « Experimental investigation on the seismic behaviour of Norht-European masonry houses », *Actes de la 7° Congresso de Sismologia e Engenharia Sismica (SISMICA)*, Porto, 26-28 septembre 2007.

[DEP 10] DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOUVERNMENT, « English Housing Survey – Housing sotck report 2008 », *National Statistics*, October 2010.

[EC8 04] EN 1998-1-1: 2004, « Eurocode 8: Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1: Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments », Décembre 2004.

[PAS 15] INTERNATIONAL PASSIVE HOUSE ASSOCIATION (N.D.), « Passive House », dernière visite le 25 mars 2016, www.passivehouse-international.org/index.php?page_id=78.

[KAR 09] KARANTONI F.V., LIRANTZAKI F.N, « Seismic behaviour of "Simple Masonry Buildings" according to EN 1998 », *Actes de la 7th International Conference on Earthquake Resistance Engineering Structures*, Limassol, 11-13 mai 2009.

[LAG 13] LAGOMARSINO S., PENNA A., GALASCO A., CATTARI S., « TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings », *Engineering Structures*, vol. 56, 2013, p. 1787-1799.

[MAR 14] MARTENS D., « Thermal Break with Cellular Glass Units in Load-Bearing Masonry Walls », *Actes de la 9th International Masonry Conference (IMC)*, Guimaraes, 7-9 juillet 2014.

[MOR 14] MORDANT C., DIETZ M., TAYLOR C., PLUMIER A., DEGÉE H., *Seismic behaviour of thin-bed layered unreinforced clay masonry shear walls including soundproofing elements*, Seismic Evaluation and Rehabilitation of Structures (chap. 6), eds Alper Ilki and Mochal N. Fardis, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering series Vol. 26, Springer International Publishing Switzerland 2014, 77-93

[MOR 15a] MORDANT C., DENOËL V., DEGÉE H, « Timoshenko beam identification of unreinforced load-bearing masonry walls including soundproofing devices », *Journal of Engineering Mechanics*, (soumis en octobre 2015).

[MOR 15b] MORDANT C., DENOËL V., DEGÉE H, « Comparison of experimental results and numerical modelling of unreinforced load-bearing masonry structures subjected to earthquake loading », *Actes de la SECED Conference*, Cambridge, 9-10 juillet 2015.

[SOU 14] SOUSA L.C., SOUSA H., CASTRO C.F., ANTONIO C.C., SOUSA R., « A new lighweight masonry block: Thermal and mechanical performance », *Archives of civil and mechanical engineering*, vol. 14, p. 160-169.

Régimes de réponse de structures en béton armé impactées par des avalanches de neige

Ousset I.[1], Bertrand D.[2], Thibert E.[1], Limam A.[2], Naaïm M.[1]

[1] *Université Grenoble Alpes, Irstea, UR ETGR, mail : isabelle.ousset@irstea.fr*

[2] *INSA Lyon, LGCIE, mail : david.bertrand@insa-lyon.fr*

RÉSUMÉ. *Cet article traite du comportement de structures en béton armé (BA) sous l'effet de chargements d'avalanche de neige. L'approche pression-impulsion proposée permet de mettre en exergue trois types de comportement théoriques en fonction de l'impulsion du chargement. En pratique, si l'on confronte les diagrammes obtenus pour deux types de structure à des données réelles de signaux de pression d'avalanche, on s'aperçoit que la structure de protection de type mur en L étudiée ici est susceptible de se comporter de façon quasi-statique alors qu'une structure de type poteaux-poutres aurait tendance à se comporter de façon dynamique.*

ABSTRACT. *This article deals with the behaviour of reinforced concrete civil engineering structures submitted to snow avalanches. The proposed pressure-impulse approach allows highlighting three theoretical types of behaviour: quasi-static, dynamic and impulsive. In practice, by comparing the pressure-impulse diagrams of two studied structures with real avalanche pressure signals, we see that the L-shaped protective structure studied here behaves rather in a quasi-static way while a post-and-beam structure would tend to behave in a dynamic way.*

MOTS-CLÉS : *génie civil, béton armé, avalanche de neige, éléments finis, diagrammes pression-impulsion.*

KEYWORDS: *civil engineering, reinforced concrete, snow avalanche, finite elements, pressure-impulse diagrams.*

1. Introduction

En l'absence de connaissances suffisantes sur l'effet dynamique des avalanches sur le comportement de structures de génie civil en béton armé (BA), ces dernières sont encore pour la plupart dimensionnées suivant une approche statique avec introduction paliative de coefficients de sécurité [GIV 04]. Le chargement issu d'une avalanche étant un champ de pression évoluant au cours du temps, on peut cependant s'attendre à des réponses structurelles différentes suivant la vitesse de chargement ou plus généralement suivant les caractéristiques temporelles/fréquentielles du signal. Dans le cadre de l'étude de structures complexes, [BER 07] et [DAU 13] considèrent ainsi que les effets inertiels sont à prendre en compte. Dans le cas de l'étude de fiabilité de murs représentant le bâti, [BER 10] et [FAV 14a, FAV 14b] font par contre l'hypothèse d'un comportement quasi-statique. Par ailleurs, les structures type pylône font l'objet de chargements particuliers pour les avalanches [SOV 16]. Cet article s'intéresse donc à l'étude, par la modélisation numérique, du comportement mécanique de structures de génie civil en béton armé soumises à des avalanches de neige et à l'amélioration des approches de dimensionnement associées. L'objectif est de préciser la nature de la réponse de la structure c'est-à-dire préciser dans quelles conditions cette réponse peut être considérée comme quasi-statique ou dynamique.

Un mur BA en forme de L représentatif d'une structure de protection paravalanche [OUS 15b] et une structure de type poteaux-poutres à 3 étages de type bâti [TAT 12] ont été étudiés à l'aide de modèles numériques selon la méthode des éléments finis dans lesquels est introduit un signal de pression de type triangle isocèle. La nature de la réponse de ces structures dépend bien entendu de leurs fréquences propres qui se déduisent en élastique par une analyse modale. Une approche plus approfondie est ici proposée qui permet entre autres de prendre en compte les non-linéarités des matériaux constituant la structure. Le régime de la réponse de la structure est exploré à l'aide d'une approche pression-impulsion plus souvent utilisée dans le cadre des structures soumises à explosion [PAR 10]. Cette approche consiste à construire un diagramme pression-impulsion et plus exactement à tracer, pour différents isodommages correspondant ici à une valeur de déplacement de la structure, des courbes représentant la pression conduisant au critère de comportement retenu en fonction de l'impulsion du signal de pression d'avalanche.

2. Méthodes

2.1. *Structures étudiées*

2.1.1. *Structure de protection de type mur en L*

La structure de protection étudiée est constituée d'un voile de hauteur 9,60 m, de largeur 14,80 m et d'épaisseur 1,50 m et d'une semelle de longueur 9,00 m et d'épaisseur 1,50 m (figure 1a). Elle est renforcée par des armatures de diamètres compris entre 14 et 32 mm et espacées en moyenne de 0,15 m dans le sens de la largeur. Elle représente de façon simplifiée une des dents déflectrices (figure 1b) du dispositif situé dans le couloir de Taconnaz, dont l'objectif est de permettre l'étalement d'un écoulement d'avalanche de neige avant son ralentissement par des tas freineurs et son arrêt final en amont d'une digue frontale. Le choix de cette structure s'explique par le fait que, suite à l'endommagement de deux de ces dents lors d'une avalanche survenue en 1999, un essai sur modèle réduit a été réalisé en laboratoire pour comprendre le mode de rupture de la structure et permettre le calage ultérieur de modèles numériques.

Dans la mesure où l'essai expérimental a montré dans le sens de la largeur (suivant z) une symétrie de comportement de la structure, celle-ci est modélisée en 2D sous Cast3M à l'aide d'éléments finis de type quadrilatères à 4 noeuds (QUA4) pour le béton et linéaires à 2 noeuds (SEG2) pour l'acier. La semelle est considérée comme totalement encastrée et les lois de comportement du béton et de l'acier sont de type élasto-plastiques avec écrouissage négatif dans le cas du béton et positif dans le cas de l'acier ([OUS 15b, OUS 15a]).

2.1.2. *Structure de type poteaux-poutres*

La structure poteaux-poutres déjà étudiée dans le cadre sismique par [TAT 11, TAT 12] est un portique constitué d'une baie d'une largeur de 4 m et d'une hauteur de 2,75 m et de deux étages d'une hauteur de 3 m (figure 2).

Les colonnes ont toutes la même section 25 cm x 25 cm et sont renforcées par des armatures de diamètre 13 mm (figure 3a). Les planchers contribuent à la rigidité des poteaux par le biais de la section de poutre présentée à la figure 3b. La hauteur de ces poutres est de 50 cm dont 15 cm correspondent à l'épaisseur de la dalle. Des armatures

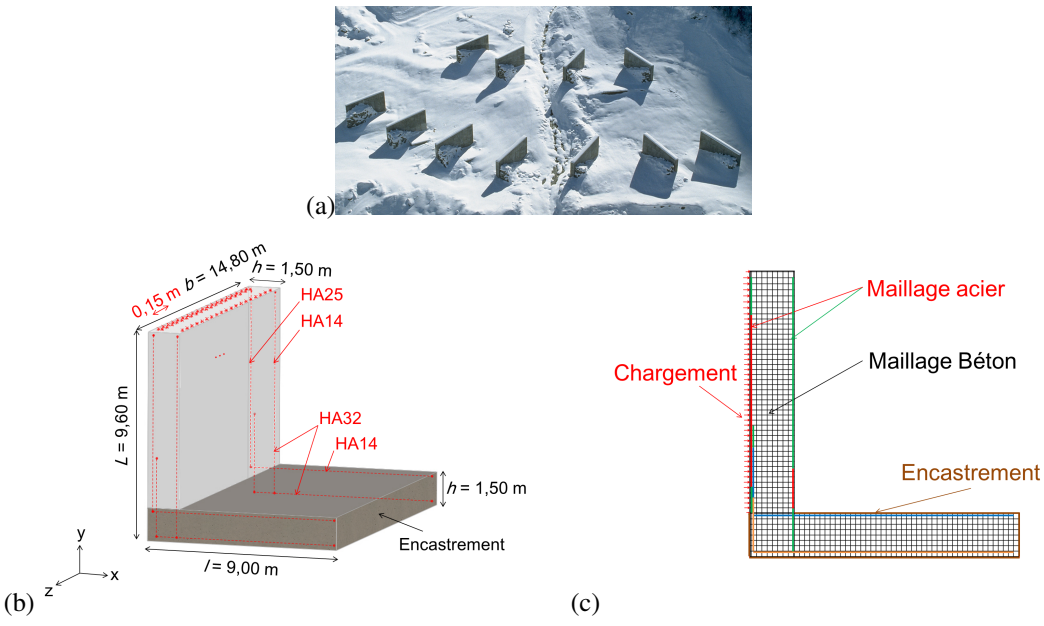


Figure 1. *Structure étudiée : (a) Dents déflectrices de Taconnaz (Photo F. Valla - Irstea) (b) Structure simplifiée (c) Modèle éléments finis*

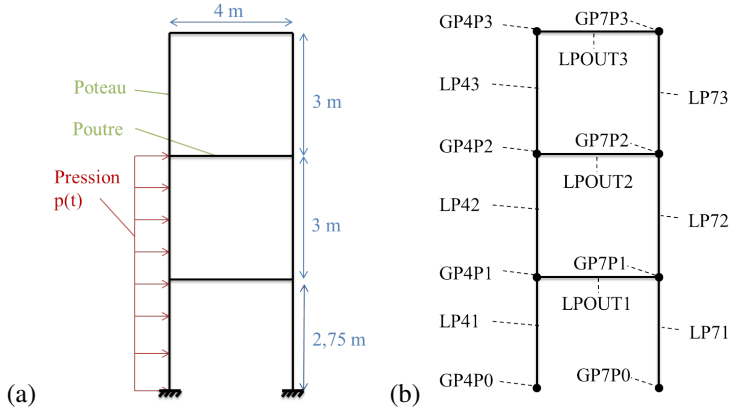


Figure 2. *Structure poteaux-poutres considérée : (a) dimensions et (b) modèle numérique [TAT 11]*

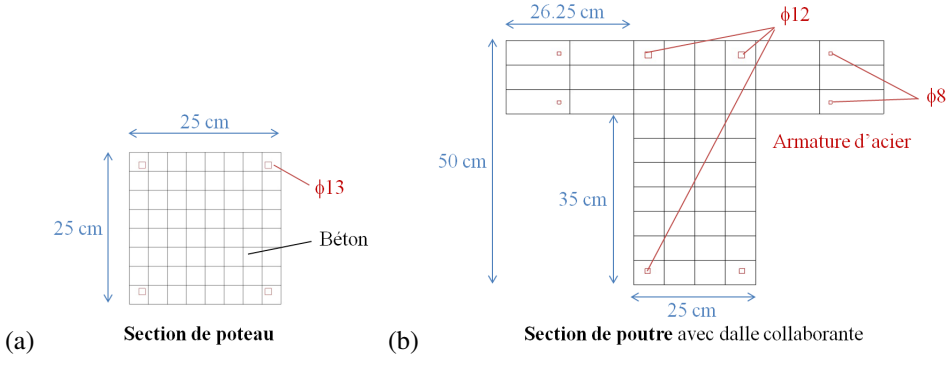


Figure 3. *Sections de la structure poteaux-poutres : (a) pour les poteaux et (b) pour les poutres [TAT 11]*

longitudinales de diamètre 8 et 12 mm assurent le renforcement respectivement des ailes et de la partie centrale de la poutre. Les poteaux, encastrés en pied, et les poutres sont modélisés à l'aide d'éléments finis multi-fibres avec une cinématique de type Timoshenko. Les comportements des fibres de béton et d'acier sont décrits à l'aide

respectivement des lois de Hognestad (Béton_Uni dans Cast3M) et Menegotto-Pinto (Acier_Uni dans Cast3M) ([TAT 11]).

2.2. *Chargement*

Un chargement lié à une avalanche de neige est un champ de pression qui évolue au cours du temps. Le profil de pression retenu ici est un signal synthétique de type triangle isocèle caractérisé par une pression au pic P_{max} et un temps de montée en charge t_m, tels que spécifiés à la figure 4. Ce signal peut également être caractérisé par une impulsion qui correspond à la quantité de mouvement transférée par la force appliquée sur la structure à savoir :

$$I \;=\; \int_0^{t_{chgt}} F_{ext}(t)\,dt \;=\; S \int_0^{t_{chgt}} P(t)\,dt \tag{1}$$

où S représente la surface d'application de la sollicitation et est considérée comme constante dans cette étude et P(t) désigne l'évolution temporelle de la pression de chargement. On a donc :

$$I/S \;=\; \frac{1}{2}\,P_{max}\,t_{chgt} \;=\; P_{max}\,t_m \tag{2}$$

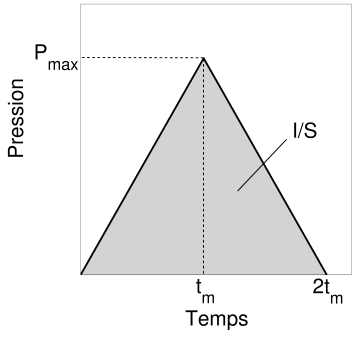


Figure 4. *Signal avalancheux retenu dans cette étude*

Afin de ne pas complexifier le modèle mécanique et augmenter les temps de calcul, la variation spatiale de la sollicitation n'a pas été prise compte dans la présente étude. Le champ de pression appliqué est ainsi considéré comme homogène sur l'ensemble de la structure et appliqué sur la hauteur totale non encastrée de l'ouvrage (figure 1c) dans le cas de la structure de protection et sur les deux premiers étages (figure 2a) dans le cas de la structure de type poteaux-poutres.

2.3. *Diagramme Pression-Impulsion : Principe et construction*

L'approche diagramme pression-impulsion, couramment utilisée dans le domaine de l'explosion, permet de visualiser, sur un même graphique, le comportement de la structure suivant différents cas de charge [PAR 10]. Un tel diagramme représente la pression conduisant à un même niveau de dommage de la structure, pour différentes impulsions.

Ces diagrammes font ressortir trois modes de réponse de la structure suivant le chargement appliqué [PAR 10] :

– mode impulsionnel, pour lequel la réponse de la structure ne dépend pour ainsi dire que de la durée du signal et pas de la pression ;

– mode quasi-statique, pour lequel seule intervient la pression ;

– mode dynamique, qui est un mode intermédiaire où la pression et la durée du signal ont une influence sur la réponse de la structure.

Les diagrammes pression-impulsion sont construits en se fixant une durée de signal (soit, dans le cas présent, en se fixant t_m) et en recherchant, par itérations successives, la pression maximale conduisant au niveau de dommage

fixé. Une automatisation de la construction de ces diagrammes est proposée dans cette étude, basée sur les principes suivants :

– discrétisation temporelle :

Afin d'assurer une bonne convergence de l'approche par éléments finis, le pas de temps de calcul Δt_{FEM} est adapté à la vitesse de sollicitation et calculé de manière à conserver un incrément de pression ΔP_{FEM} constant pour toutes les simulations soit :

$$\Delta t_{FEM} \; = \; \Delta P_{FEM} \, \frac{t_m}{P_{max}} \qquad \text{avec} \qquad \Delta P_{FEM} \; = \; cte \tag{3}$$

– critère d'atteinte du dommage :

Le critère d'arrêt associé à l'atteinte du dommage fixé D_{dom} est défini de la manière suivante :

$$\frac{D_{dom} \; - \; D^i_{max}}{D_{dom}} \; \leq \; 1 \, \% \tag{4}$$

où D^i_{max} représente le déplacement maximal atteint lors de la simulation de l'itération i.

Compte-tenu de la nature non linéaire de l'algorithme de calcul aux éléments finis, des précautions doivent être prises de façon à assurer la convergence de la procédure vers le critère 4. Dans un cas linéaire, la proportionnalité entre déplacement et pression serait assurée et l'évolution de la pression maximale appliquée de façon à converger vers l'isodommage retenu pourrait être calculée selon l'équation 5 :

$$P^{i+1}_{max} \; = \; P^i_{max} \, \left(1 \; + \; \frac{D_{dom} \; - \; D^i_{max}}{D_{dom}} \right) \tag{5}$$

où P^{i+1}_{max} et P^i_{max} sont les pressions maximales appliquées à l'ouvrage respectivement aux itérations *i+1* et i.

L'algorithme de calcul retenu pour modéliser le comportement de la structure étant dans le cas présent non linéaire, la convergence vers le niveau de dommage recherché D_{dom} est plus complexe à obtenir. L'idée retenue est dans ce cas de contraindre P^i_{max} à évoluer dans un intervalle de pression qui encadre la pression produisant D_{dom} : $\left[P^{minCV}_{max} \; P^{maxCV}_{max} \right]$. Ces bornes sont actualisées à chaque fin d'itération i selon les formules 6.

$$\begin{aligned} si \; D^i_{max} \; > \; D_{dom}, \; P^{maxCV}_{max} \; = \; P^i_{max} \\ et \; si \; D^i_{max} \; < \; D_{dom}, \; P^{minCV}_{max} \; = \; P^i_{max} \end{aligned} \tag{6}$$

P^{i+1}_{max} est ensuite dans un premier temps pris égal à la valeur donnée par l'équation 5. Puis, si $P^{i+1}_{max} \; \notin \; \left[P^{minCV}_{max} \; P^{maxCV}_{max} \right]$, cette valeur est corrigée selon les formules 7.

$$\begin{aligned} si \; P^{i+1}_{max} \; > \; P^{maxCV}_{max}, P^{i+1}_{max} \; = \; P^{i+1}_{max} \; - \; \frac{1}{2} \, \left(P^{maxCV}_{max} \; - \; P^i_{max} \right) \\ et \; si \; P^{i+1}_{max} \; < \; P^{minCV}_{max}, P^{i+1}_{max} \; = \; P^{i+1}_{max} \; + \; \frac{1}{2} \, \left(P^i_{max} \; - \; P^{maxCV}_{max} \right) \end{aligned} \tag{7}$$

Les différents couples (pression, impulsion) obtenus conduisant à l'isodommage retenu permettent ensuite de tracer un diagramme pression-impulsion représentatif du comportement de la structure.

3. Résultats

Dans le cas présent, le niveau de dommage correspond à un déplacement donné de la structure, calculé en tête de voile pour la structure de protection et au point GP4P2 pour la structure poteaux-poutres (figure 2b).

Les figures 5a et b présentent les diagrammes pression-impulsion obtenus pour des valeurs de déplacement de 5, 10, 15 et 20 mm sur lesquels on peut observer les trois types de comportement : quasi-statique (partie horizontale des courbes), impulsionnelle (partie verticale) et dynamique (zone de transition entre les deux parties précédentes). Sont également reportées dans cette figure des valeurs de pression-impulsion issues de divers signaux avalancheux réels mesurés *in situ* . Ces signaux (figure 5c) sont issus de trois sites expérimentaux : ceux du Lautaret ([THI 15,

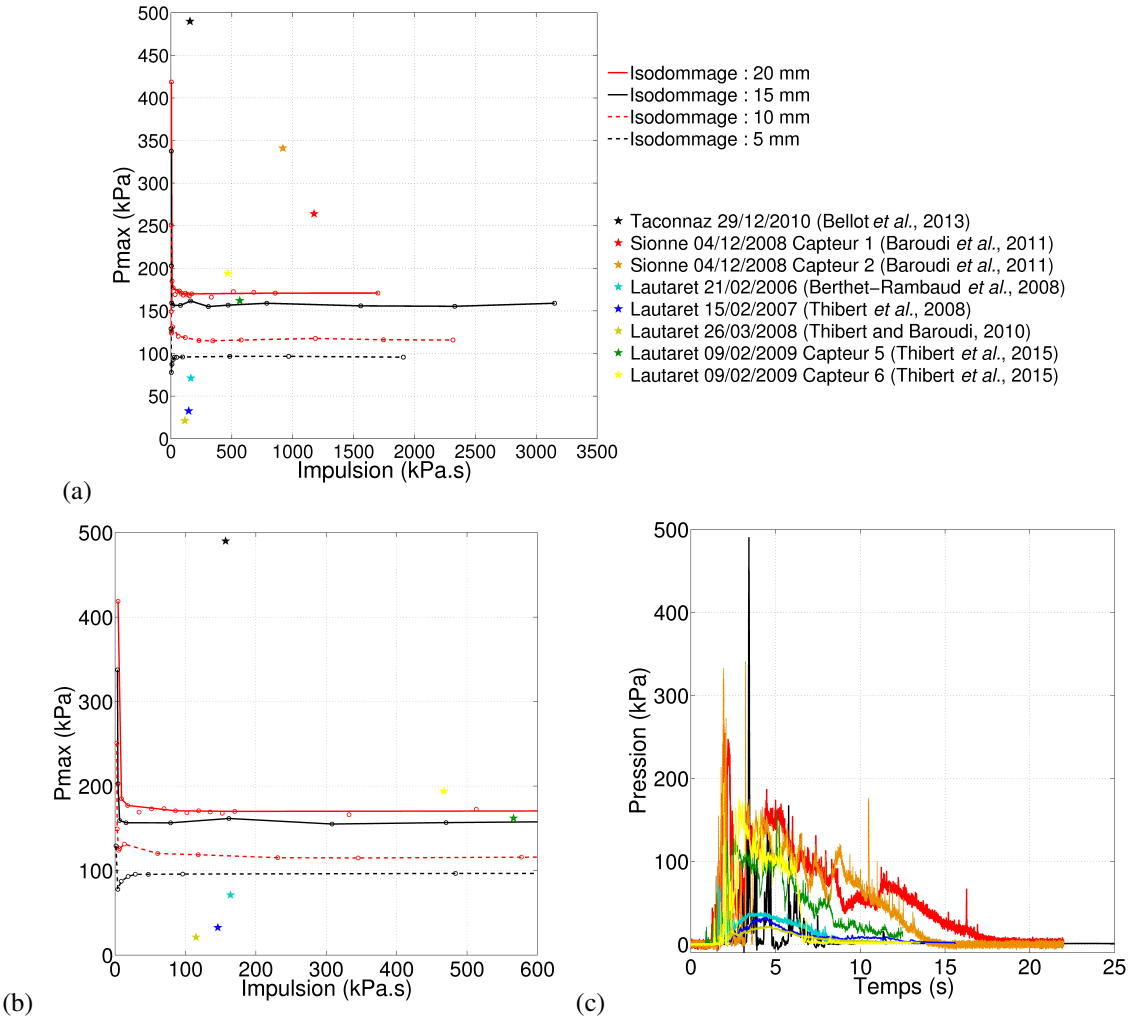


Figure 5. *(a) Diagrammes pression-impulsion pour la structure de type mur en L, comparés à des valeurs de pression-impulsion réelles issues de signaux avalancheux mesurés in situ, (b) zoom sur les zones de transition quasi-statique/dynamique/impulsionnel et (c) signaux avalancheux réels utilisés pour calculer les valeurs de pression-impulsion réelles reportées sur les diagrammes*

BER 08, THI 08, THI 10, THI 13]), de la Sionne ([SOV 13, BAR 11]) et de Taconnaz ([BEL 13]). D'après la figure 5b, on voit que pour les avalanches de la Sionne et du Lautaret, le comportement de la structure étudiée serait plutôt de type quasi-statique. *A contrario*, pour l'avalanche de Taconnaz, on semble se rapprocher d'un comportement dynamique. Ceci est vraisemblablement dû au caractère hétérogène de l'avalanche du 29 décembre 2010 pour laquelle on a pu observer la présence de blocs de glace provenant très probablement du glacier situé en amont. En conclusion, alors que pour des avalanches de neige dense relativement homogènes, le comportement de la structure de protection étudiée est *a priori* de type quasi-statique, pour des avalanches de neige mixte avec possibilité de blocs au sein même de l'écoulement, il convient de rester prudent sur le type de comportement de la structure à prendre en compte.

Des diagrammes pression-impulsion ont également été établis pour des déplacements de la structure poteaux-poutres de 5, 10 et 15 mm. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 6. La transition entre quasi-statique et dynamique intervient pour ce type de structures pour des impulsions de l'ordre de 20 - 30 kPa.s et des pressions au pic de 4,5 à 7 kPa soit pour des temps de montée de l'ordre de 3 à 6 s. Les deux exemples de signaux avalancheux enregistrés au col du Lautaret montrent que des effets inertiels sont à prendre en compte pour de telles structures susceptibles d'être sollicitées par des avalanches de neige dense, le temps de montée en charge de telles avalanches de faible ampleur (avec une pression au pic relativement faible) étant généralement de l'ordre de la seconde voire inférieurs.

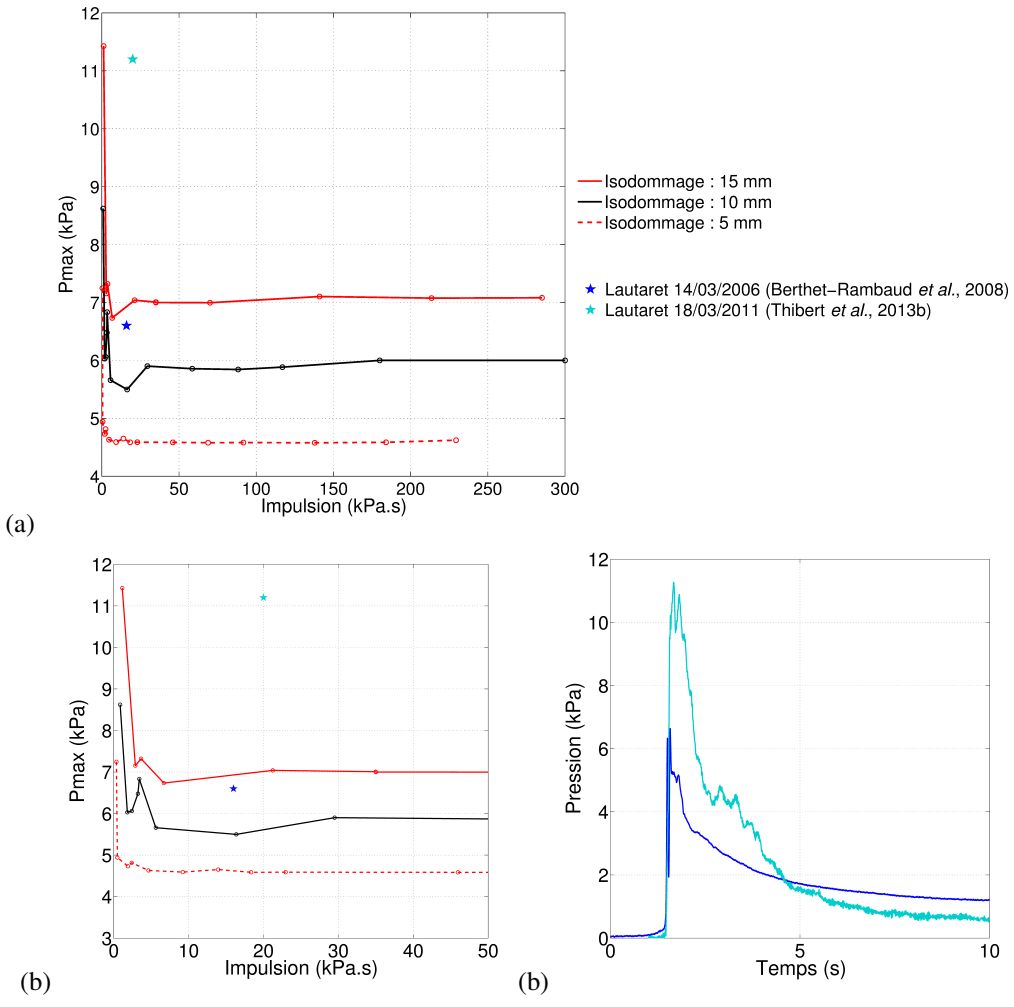


Figure 6. *(a) Diagrammes pression-impulsion pour la structure poteaux-poutres à 3 étages, (b) zoom sur les zones de transition quasi-statique / dynamique / impulsionnel et (c) signaux avalancheux reportés sur les diagrammes*

4. Conclusion

Le chargement issu d'une avalanche est un champ de pression évoluant au cours du temps. Aussi, afin d'assurer la représentativité d'un calcul de structure sollicitée par ce type d'aléa, il est nécessaire d'identifier au préalable le régime dans lequel va répondre l'ouvrage, à savoir quasi-statique ou dynamique. Une approche diagramme pression-impulsion, couramment employée dans le domaine des structures soumises à des chargements de type explosion, est ici proposée et présente l'avantage de prendre en compte les non linéarités des matériaux. Cette approche consiste à construire un diagramme pression-impulsion pour différents isodommages correspondant ici à des valeurs de déplacement de la structure. Elle permet d'identifier trois types de réponses : quasi-statique, dynamique et impulsionnelle. De tels diagrammes ont été réalisés pour une structure de protection ainsi qu'une structure de type poteaux-poutres à 3 étages. Le report sur ces diagrammes de valeurs de pression et impulsion issues de signaux avalancheux réels mesurés permet de conclure que la structure paravalanche étudiée se comporte *a priori* de façon quasi-statique sous l'effet d'un champ de pression issu d'avalanches de neige dense homogènes (sans présence de blocs de glace ou de pierres) alors que par contre les structures de type poteaux-poutres sont susceptibles de se comporter de façon plus dynamique. Pour des avalanches mixtes avec présence d'hétérogénéités telles que celles observées à Taconnaz, il convient cependant de rester prudent. Par la suite, il serait intéressant de compléter ces diagrammes pour d'autres types de dommages et de structure. Un dommage caractérisé par un paramètre local tel que les déformations ou les contraintes permettrait par exemple de préciser au niveau du diagramme les différentes phases de comportement de la structure (élastique, fissuration du béton et plastification des aciers). Le cas de murs en béton faiblement armés représentatifs de certains bâtis pour lesquels une hypothèse de comportement quasi-statique est actuellement faite pour le calcul de risque [BER 10, FAV 14a, FAV 14b] pourrait aussi faire

l'objet d'investigations de type diagramme pression-impulsion. Enfin, il serait important de prendre en compte la distribution spatiale de la pression d'impact des avalanches de neige dense, cette pression pouvant fortement varier suivant la hauteur.

5. Bibliographie

[BAR 11] BAROUDI D., SOVILLA B., THIBERT E., « Effects of flow regime and sensor geometry on snow avalanche impact-pressure measurements », *Journal of Glaciology*, vol. 57, n° 202, p. 277-288, 2011.

[BEL 13] BELLOT H., NAAÏM-BOUVET F., CACCAMO P., FAUG T., OUSSET F., « Taconnaz avalanche path : pressure and velocity measurements on breaking mounds », *International Snow Science Workshop*, Grenoble - Chamonix Mont-Blanc, p. 1378-1383, October 7-11 2013.

[BER 07] BERTHET-RAMBAUD P., LIMAM A., ROENELLE P., RAPIN F., TACNET J.-M., « Avalanche action on rigid structures : Back-analysis of Taconnaz deflective wall's collapse in February 1999 », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 47, p. 16-31, 2007.

[BER 08] BERTHET-RAMBAUD P., LIMAM A., BAROUDI D., THIBERT E., TAILLANDIER J.-M., « Characterization of avalanche loading on impacted structures : a new approach based on inverse analysis », *Journal of Glaciology*, vol. 54, p. 324-332, 2008.

[BER 10] BERTRAND D., NAAIM M., BRUN M., « Physical vulnerability of reinforced concrete buildings impacted by snow avalanches », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 10, p. 1531-1545, 2010.

[DAU 13] DAUDON D., BAROTH J., Y. M., PERROTIN P., MOMMESSIN M., « Sensitivity of a reinforced concrete protective gallery under a snow avalanche loading », *Structural Safety*, vol. 441, p. 47-56, 2013.

[FAV 14a] FAVIER P., « Sensitivity of avalanche risk to vulnerability relations », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 108, p. 163-177, 2014.

[FAV 14b] FAVIER P., Une approche intégrée du risque avalanche : quantification de la vulnérabilité physique et humaine et optimisation des structures de protection, PhD thesis, Université de Grenoble, 2014.

[GIV 04] GIVRY M., PERFETINI P., *Construire en montagne : la prise en compte du risque d'avalanche*, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, www.marc-givry-architecte.org, 2004.

[OUS 15a] OUSSET I., Contribution à la modélisation par éléments finis des structures en béton armé - Application à la structure de protection de Taconnaz, PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2015.

[OUS 15b] OUSSET I., BERTRAND D., BRUN M., THIBERT E., LIMAM A., NAAÏM M., « Static and dynamic FE analysis of an RC protective structure dedicated to snow avalanche mitigation », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 112, p. 95-111, 2015.

[PAR 10] PARIS L., « Comportement des structures soumises à une explosion », *Techniques de l'ingénieur*, vol. SE5064, p. 1-26, 2010.

[SOV 13] SOVILLA B., MCELWAINE J., STEINKOGLER W., HILLER M., DUFOUR F., SURINACH E., PEREZ GUILLEN C., FISCHER J.-T., THIBERT E., BAROUDI D., « The full-scale avalanche dynamics test site Vallée de la Sionne », *International Snow Science Workshop*, Grenoble - Chamonix Mont-Blanc, p. 1350-1357, October 7-11 2013.

[SOV 16] SOVILLA B., FAUG T., KÖHLER A., BAROUDI D., FISCHER J.-T., THIBERT E., « Gravitational wet avalanche pressure on pylon-like structures », *Cold Regions Science and Technology*, 2016, doi :10.1016/j.coldregions.2016.03.002.

[TAT 11] TATAIE L., Méthodes simplifiées basées sur une approche quasi-statique pour l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages soumis à des excitations sismiques, PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.

[TAT 12] TATAIE L., BRUN M., REYNOUARD J. M., « Modal pushover procedures for seismic evaluation of reinforced concrete structures : using new nonlinear single degree of freedom systems », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 16(2), p. 178-203, 2012.

[THI 08] THIBERT E., BAROUDI D., LIMAM A., BERTHET-RAMBAUD P., « Avalanche impact pressure on an instrumented structure », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 54, p. 206-215, 2008.

[THI 10] THIBERT E., BAROUDI D., « Impact energy of an avalanche on a structure », *Annals of Glaciology*, vol. 51(54), p. 45-54, 2010.

[THI 13] THIBERT E., FAUG T., BELLOT H., BAROUDI D., « Avalanche impact pressure on a plate-like obstacle », *International Snow Science Workshop*, Grenoble - Chamonix Mont-Blanc, p. 663-670, October 7-11 2013.

[THI 15] THIBERT E., BELLOT H., RAVANAT X., OUSSET F., PULFER G., NAAIM M., HAGENMULLER P., NAAIM-BOUVET F., FAUG T., NISHIMURA K., ITO Y., BAROUDI D., PROKOP A., SCHÖN P., SORUCO A., VINCENT C., LIMAM A., HÉNO R., « The full-scale avalanche test-site at Lautaret Pass (French Alps) », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 115, p. 30-41, 2015.

Évaluation des impacts économiques indirects selon un scénario de risque d'inondation

Ismaïl Saadi[1], Ahmed Mustafa[1], Jacques Teller[1], Mario Cools[1]

[1] University of Liège, ArGEnCo, Local Environment Management & Analysis (LEMA), Allée de la Découverte 9, Quartier Polytech 1, 4000 Liège, Belgium

Corresponding Author : ismail.saadi@ulg.ac.be

RÉSUMÉ. *Dans ce papier, nous proposons un modèle intégré permettant d'évaluer les impacts économiques indirects causés par les risques d'inondation en Belgique. En tenant compte des risques d'inondation induits par l'accroissement de l'occupation du sol selon différents scénarios climatiques, les impacts économiques indirects peuvent être estimés à l'échelle microscopique en utilisant un modèle Input-Output (IO). IO est un modèle économétrique qui représente, sous forme d'une matrice Production-Consommation (P-C), les flux de marchandises et de matières premières entre les différents secteurs industriels classifiés selon la nomenclature NACE. Cette approche a donc été développée afin de décrire et comprendre, de façon plus précise, la propagation des dommages économiques d'ordre supérieur à travers l'ensemble de la structure économique. Cet outil de simulation permettra notamment d'opter pour les meilleures politiques d'aménagement du territoire dans les zones à risque.*

ABSTRACT. *In this paper, we propose an integrated framework to estimate the indirect economic impact due to flood risk in Belgium. By taking into account the land-use change and different scenarios of climate change, the economic impact can be estimated at the micro-scale level using an Input-Output (I-O) approach. I-O is an econometric model that represents the structure of an economy in the form of a Production-Consumption (P-C) matrix. From a physical point of view, it corresponds to commodity flows between different sectors classified according to the NACE code. This approach is implemented to describe and to better understand the propagation of higher order damage through the entire economic structure. This tool can be used to take strategic decisions in the case of transport and land-use policies within vulnerable areas.*

MOTS-CLÉS : *Analyse Input-Output, risques d'inondation, impact indirect.*

KEYWORDS: *Input-Output analysis, flood risk, indirect impact.*

1. Introduction

Dans ce papier, l'objectif est de présenter une approche simplifiée essentiellement basée sur les travaux de Leontief [LEO 70] pour quantifier les impacts économiques indirects. En effet, la structure économique d'un pays donné peut être exprimée sous forme d'une matrice production-consommation (P-C). Chaque secteur d'activité importe des matières premières et/ou demande des services, de même qu'il génère des produits finis et/ou preste des services. Ainsi, chaque cellule de la matrice peut être assimilée à une quantité de matière exprimée en valeur monétaire (euros).

L'approche Input-Output (I-O) est très populaire auprès des économistes en raison de son efficacité et de sa flexibilité en terme d'implémentation. Elle permet notamment d'intégrer les effets environnementaux pouvant impacter l'ensemble de la structure économique de même que la relativité de son intensité [ZOU 16, YAN 16, YUA 15, ZHA 15]. L'analyse I-O peut être étendue pour couvrir plusieurs régions (MRIO) de sorte que l'information spatiale soit intégrée, à l'image des travaux de [ZHA 15].

Il existe également dans la littérature scientifique, des modèles I-O plus sophistiqués qui tiennent compte des effets dynamiques avec notamment l'intégration d'une variable temporelle [LIE 00]. En effet, l'une des principales hypothèses du modèle I-O standard repose sur l'invariabilité de la structure économique au cours du temps. Cette hypothèse est généralement valable sur des périodes plus ou moins courtes, cependant, pour des estimations d'impact s'étalant sur plusieurs années, les modèles dynamiques, bien que plus complexes à calibrer car plus gourmand en terme de données, permettent plus de réalisme.

Par ailleurs, la structure du modèle I-O est parfaitement adaptée pour être couplée avec le modèle 4-étapes qui permet d'estimer et simuler les flux de marchandises à travers un réseau de transport. Cependant, dans ce papier nous nous limiterons à l'analyse du modèle statique I-O ainsi qu'aux études des effets d'ordre supérieur suite à une perturbation d'une partie de la structure économique. Enfin, la calibration est assurée à l'aide des tables entrée-sortie publiées par le Bureau du Plan en 2010.

Dans la section "Méthodologie", nous présenterons les équations fondamentales décrivant la structure économique MRIO. Ensuite, nous exposerons la manière dont le modèle MRIO a été calibré ainsi que la définition et l'origine de chaque variable. En guise d'application, un scénario a été imaginé afin d'illustrer la façon dont se mesure un impact indirect. Sur base de ce cas test, une extension peut facilement être envisageable. Par ailleurs, une section est prévue pour présenter les résultats préliminaires. Enfin, nous établirons les principales conclusions de cette étude et les possibles pistes d'amélioration.

2. Méthodologie

En particulier, l'analyse I-O permet de déterminer l'effet d'une augmentation de la demande y pour n'importe quel secteur d'activité S. Dans ce cas, si la demande y augmente, le secteur S devra produire une plus grande quantité afin d'assurer les besoins exigés par y. De plus, pour que S produise une quantité supplémentaire, il convient d'adapter toutes les matières premières, produits intermédiaires et/ou services pour rendre effectif la production de S. À travers cette brève description, il est plus simple de comprendre l'intérêt d'une structure matricielle. Car elle renferme toutes les interconnexions entre les différents secteurs d'activité.

Ainsi, les produits intermédiaires émanant de chaque secteur d'activité doivent être exprimés en fonction de la demande finale (consommation) selon la relation $x = f(y)$.

De cette façon, toute variation de y se traduit par une variation de x. Dans un premier temps, il convient de calculer les ressources totales (matrice RT). Chaque secteur produit une quantité

$$x_i = z_{i1} + z_{i2} + ... + z_{ij} + y_i \qquad [1]$$

qui correspond tout simplement à la somme des produits intermédiaires et de la demande finale associée à ce secteur i.

Par ailleurs, si chaque élément z_{ij} est divisé par x_j (ressources totales selon j), nous obtenons la matrice RT exprimant la structure sous forme de ressources. La manipulation permettant cette transition est définie par la relation :

$$RT_{ij} = z_{ij}/x_j \quad [2]$$

Cette forme permet de connaitre la proportion de produits nécessaires à chaque secteur. En d'autres termes, il est plus simple d'identifier quel secteur nécessite d'importantes quantités de matières premières/produits intermédiaires. À partir de [2], on obtient

$$z_{ij} = RT_{ij}x_j \quad [3]$$

En introduisant [3] dans [1], il vient

$$x_i = RT_{i1}x_1 + RT_{i2}x_2 + \ldots + RT_{ij}x_j + ... + y_i \quad [4]$$

qui se traduit sous la forme matricielle suivante :

$$\mathbf{x} = \mathbf{RT} + \mathbf{y} \quad [5]$$

Pour obtenir une relation de type $x = f(y)$, il convient d'effectuer les manipulations suivantes :

$$\mathbf{x} = (\mathbf{1} - \mathbf{RT})^{-1}\mathbf{y} \quad [6]$$

En rebaptisant $(1 - \mathbf{RT})^{-1} = \mathbf{L}$ (la matrice de Leontief), il vient

$$\mathbf{x} = \mathbf{Ly} \quad [7]$$

La matrice de Leontief est fondamentale dans ce formalisme puisqu'elle permet d'évaluer tout impact initié par une quelconque perturbation. Supposons que la demande y pour un produit K diminue, il faut redéfinir y en introduisant la variation pour obtenir y'. Ainsi, en effectuant la manipulation suivante, nous comprenons comment chaque secteur doit adapter sa production pour satisfaire cette nouvelle demande :

$$\mathbf{x}_{NEW} = \mathbf{Ly}_{NEW} \quad [8]$$

Quant à la variation, elle est traduite par

$$\Delta\mathbf{x} = \mathbf{x}_{NEW} - \mathbf{x} \quad [9]$$

3. Application

En Belgique, la structure économique est classifiée selon 97 catégories (code NACE). La catégorie 31 comporte les activités liées aux transports terrestres. Dans la théorie des systèmes de transport, l'offre (réseau de transport) et la demande (besoins en déplacement) se rejoignent pour former un équilibre stable [DIO 11], à l'image de la théorie de l'offre et de la demande en économie. Ainsi, une perturbation au niveau du réseau de transport va inévitablement provoquer un changement dans la demande et notamment des annulations de déplacements.

Avant d'effectuer les calculs, il convient de procéder à une répartition temporelle des flux de matière car les tableaux E-S du Bureau du Plan sont définis annuellement. Supposons donc que l'activité 31 est suspendue durant une semaine (hypothèse 1), tous les flux seront donc divisés par 48. En effet, les inondations peuvent durer un certain moment empêchant le fonctionnement normal des activités à proximité immédiate, de même que les activités indirectement connectées à celles touchées en zone inondée. De plus, il faut veiller à faire de même avec la demande pour déboucher sur une demande hebdomadaire $y_{hebdomadaire}$. Il s'agit bien évidemment d'une estimation moyenne. Il se peut que certaines périodes soient plus actives économiquement que d'autres et vice versa. Par ailleurs, la Figure 1 présente les 10 premiers secteurs touchés par la variation de la demande. À partir du quatrième secteur, les pertes continuent à diminuer mais beaucoup plus lentement.

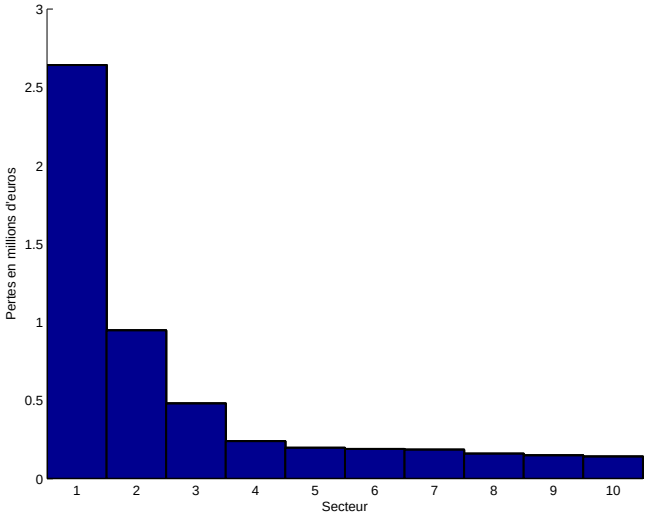


Figure 1. *Pertes économiques par secteur d'activité*

Dans cette étude de cas, on se propose d'évaluer les impacts dans le cas où l'activité « Transports terrestres » subit une baisse de 5% (hypothèse 2). Les résultats indiquent qu'en moyenne, les pertes totales (sur une semaine) s'élèvent à 7,55 millions d'euros. Le secteur le plus touché est naturellement celui des « Transports terrestres » avec 2.64 millions d'euros car moins de services sont proposés en raison de la baisse de la demande. Ensuite, vient le secteur de « l'entreposage et services auxiliaires des transports » avec une perte s'élevant approximativement à 947.000 euros. Le reste des pertes est présenté dans la Figure 1.

4. Conclusions

Dans ce papier, nous avons présenté une approche I-O pour simuler la structure économique en Belgique. Ce procédé a permis d'évaluer les variations dans la production totale et sectorielle suite à l'introduction d'une perturbation au niveau de la demande. Comme prévu, les variations sont négatives car les quantités/services nécessaires auprès du consommateur ont diminué. L'analyse I-O présente la particularité de capter l'ensemble des effets d'ordre supérieur en utilisant la matrice de Leontief L.

Dans l'avenir, l'extension du modèle permettra d'introduire des perturbations plus complexes. En effet, au-delà du secteur "Transports routiers", d'autres secteurs sont concernés comme le commerce de détail. Les pertes sont donc beaucoup plus importantes que celles estimées dans cette application.

Par ailleurs, l'intégration d'une variable spatiale permettra d'identifier précisément quels secteurs sont concernés par la perturbation. De plus, le couplage avec le modèle de transport permettra également de mettre à jour les flux de marchandises au moment de la perturbation. Dans ce cas, non seulement la demande variera, mais également les interconnexions entre secteurs d'activités. Car en réalité, tout flux de marchandise est assuré par des moyens de transport. Pour y parvenir, il convient d'abord d'identifier les cellules potentiellement affectées par un éventuel impact, ensuite en désagrégeant le flux en question à l'aide du modèle « transport », il sera possible d'identifier les déplacements affectés. Autrement, sans ce couplage il est très difficile d'estimer les pertes de manière réaliste.

Remerciements

Cette recherche a été menée grâce aux Actions de Recherche Concertées (ARC) ainsi que le Fond Spécial pour la Recherche, financés par la Fédération Wallonnie-Bruxelles.

Bibliographie

5. Bibliographie

[DIO 11] DE DIOS ORTÚZAR J., WILLUMSEN L. G., *Modelling transport*, John Wiley & Sons, 2011.

[LEO 70] LEONTIEF W., « Environmental repercussions and the economic structure : an input-output approach », *The review of economics and statistics*, p. 262–271, JSTOR, 1970.

[LIE 00] LIEW C. J., « The dynamic variable input-output model : An advancement from the Leontief dynamic input-output model », *The Annals of Regional Science*, vol. 34, n° 4, p. 591–614, Springer, 2000.

[YAN 16] YAN J., ZHAO T., KANG J., « Sensitivity analysis of technology and supply change for CO 2 emission intensity of energy-intensive industries based on input–output model », *Applied Energy*, vol. 171, p. 456–467, Elsevier, 2016.

[YUA 15] YUAN R., ZHAO T., « Changes in CO 2 emissions from China's energy-intensive industries : A subsystem input-output decomposition analysis », *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, 2015.

[ZHA 15] ZHANG Y., ZHENG H., YANG Z., SU M., LIU G., LI Y., « Multi-regional input–output model and ecological network analysis for regional embodied energy accounting in China », *Energy Policy*, vol. 86, p. 651–663, Elsevier, 2015.

[ZOU 16] ZOU Q., LIU X., « Economic effects analysis of seawater desalination in China with input–output technology », *Desalination*, vol. 380, p. 18–28, Elsevier, 2016.

SPRITE – un modèle de simulation participative pour la sensibilisation au risque de submersion marine sur l'île d'Oléron.

Franck Taillandier[1], Carole Adam[2], Etienne Delay[3], Odile Plattard[4], Mira Toumi[5]

[1]*Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France. franck.taillandier@u-bordeaux.fr*

[2]*Laboratoire d'Informatique de Grenoble (LIG), UMR 5217, Université Grenoble-Alpes. carole.adam@imag.fr*

[3]*Laboratoire GEOLAB, UMR 6042,Université de Limoges, FLSH, 39E rue Camille Guérin 87036 Limoges, etienne.delay@unilim.fr*

[4]*Univ. Paris 1, UMR 8504 Géographie-Cités. Paris. odileplattard@gmail.com*

[5]*Groupe de Recherche en Droit Economie et Gestion Université Cote d'Azur. mira.toumi@unice.fr*

RÉSUMÉ. *La submersion marine est un risque majeur pour le littoral Atlantique français, en particulier pour ses territoires insulaires tels que l'île d'Oléron. La gestion de ce risque est donc un enjeu important pour les élus locaux (communes et communauté de communes). Une bonne maitrise de ce risque repose sur une assimilation des principes d'équilibre entre sécurité des occupants, attractivité de l'île, valorisation environnementale, minimisation des coûts et satisfaction de la population. Or cet équilibre peut être difficile à comprendre et à établir pour les élus et pour la population. SPRITE est un outil de simulation participative multi-agents cherchant à répondre à cet enjeu. En plaçant le joueur dans le rôle du décideur politique, il lui permet de se rendre compte de la nécessité de mener une politique équilibrée. SPRITE donne au joueur des connaissances permettant aux élus d'éclairer leur réflexion et in fine de prendre des décisions pertinentes quant à la gestion de ce risque et pour la population de comprendre les enjeux de la politique de gestion du territoire.*

ABSTRACT. *Marine submersion is a major risk for the French Atlantic coast, particularly for its island territories such as the Isle of Oléron. Therefore, the management of this risk is a key issue for local authorities (municipalities and town community). A good management of this risk is based on the understanding of the principles of trade-off between occupant safety, attractiveness of the island, environmental valuation, and costs minimization and population satisfaction. This trade-off can be difficult to understand and establish for the decision-makers or for the population. SPRITE is a participatory multi-agent simulation tool aiming to meet this challenge. By placing the player in the role of policy maker, it allows him to realize the need for a balanced policy. SPRITE provides knowledge to the player in order the decision-makers to make informed risk decisions and the population to understand the issues of the territory management policy.*

MOTS-CLÉS : *Modèle à base d'agents, Simulation participative, Submersion marine, Gestion du territoire, Ile d'Oléron*

KEY WORDS: *Agent-based model, Participative simulation, Marine submersion, Territory management, Isle of Oléron*

1. Introduction

En 2010, la tempête Xynthia a provoqué d'importants dommages sur sur le littoral atlantique, qu'ils soient d'ordre humain (53 décès en France), matériel (4800 habitations inondées, 120 km de côtes endommagées, 40 km de voies départementales inondées…) ou économique (457 M€ de dépenses publiques) [BER 10]. Xynthia a eu un impact particulièrement fort sur les îles du littoral atlantique et notamment sur l'île d'Oléron. En effet, la conjonction entre dépression barométrique (977 hpa), fort vent de Sud-Ouest (vitesse des vents supérieure à 110 km/h avec des pointes de l'ordre de 140 à 160 km/h) et coefficient de marée élevé (102) a engendré une surcote littorale d'une hauteur comprise entre 50 à 70 cm [VIN 12][VEN 10]. Cette surcote a eu pour conséquence une submersion marine qui a touché une partie de l'île (Figure 1) causant d'importants dommages.

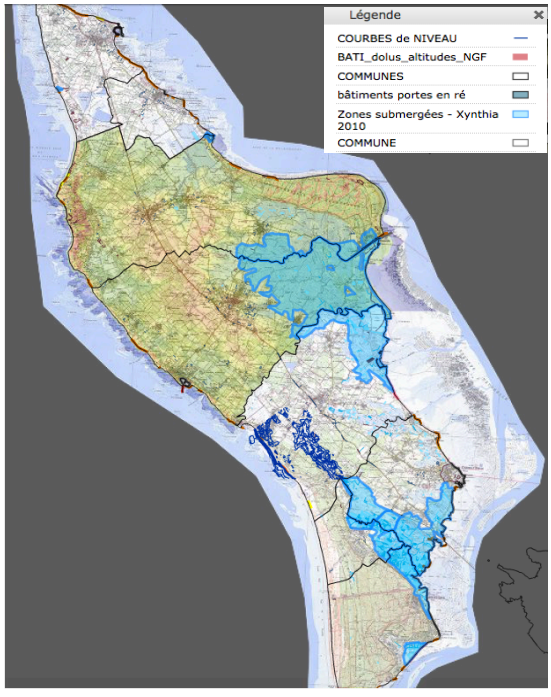


Figure 1. *Zones submergées lors de Xynthia en 2010 sur l'Île d'Oléron [UNI 16]*

Paradoxalement, si Xynthia a mis en lumière ce risque, celui-ci était alors largement sous-estimé par les autorités locales ainsi que par la population. En effet, peu d'évènements de submersion antérieurs récents et de grande ampleur s'étaient déroulés [GAR 10]. Par exemple, la précédente catastrophe ancrée dans les esprits était la tempête Martin en 1999. Cependant, contrairement à Xynthia, les dommages causés résultaient principalement du vent et peu de la submersion marine. Ainsi, le risque de submersion était alors peu considéré conduisant à une faible prise en compte de ce risque dans les politiques d'aménagement et de gestion du territoire [DUV 10] ; cela a entrainé une augmentation de la vulnérabilité de l'île (requalification de zones inondables, défaut d'entretien des digues, etc.), causant une augmentation du risque [VIN 12].

Lutter contre le risque de submersion est donc aujourd'hui une priorité pour les élus locaux de l'Île d'Oléron. Cela d'autant plus que le changement climatique devrait conduire à la multiplication des évènements météorologiques extrêmes et ainsi augmenter la probabilité d'occurrence des phénomènes de submersion marine [LEC 15]. Face à ce risque, les élus locaux (communes et communauté de commune) disposent d'un panel de solutions, telles que la construction de digues ou la modification du PLU (plan local d'urbanisme) pour rendre certaines zones inconstructibles. Parallèlement, les élus doivent répondre à différents objectifs : assurer la sécurité des habitants, respecter (et limiter) le budget, préserver la faune et la flore, valoriser l'attractivité de l'île, etc. Or chacune des solutions de maitrise du risque de submersion a tout à la fois des conséquences positives et des conséquences négatives au regard des objectifs des élus ; par exemple, la construction d'une digue permet de protéger le littoral de la submersion, mais elle induit des coûts de maintenance, elle peut dégrader le paysage et avoir un impact négatif sur la faune et la flore. Il n'y a pas de solution optimale permettant de répondre simultanément à tous les objectifs ; une bonne gestion passe par une combinaison d'actions assurant un compromis entre l'atteinte des différents objectifs. Mais l'équilibre ou le compromis peut être difficile à établir pour les élus et à comprendre par la population. En effet, les élus ne sont pas experts en

tout, et selon leur passé, leur conviction, leur connaissance et leur culture, ils vont souvent avoir tendance à privilégier certains objectifs au détriment d'autres. La compréhension de la nécessité d'atteindre un équilibre est ainsi un enjeu important tant pour les élus qui construisent la politique de gestion du territoire que pour les habitants de l'île qui peuvent ainsi mieux comprendre les enjeux de la gestion de ce risque et donc mieux accepter les décisions publiques, même lorsqu'elles peuvent avoir des conséquences directes et négatives pour eux à court terme (par exemple, un changement du PLU). SPRITE (Simulation Participative des RIsques TErritoriaux) cherche à répondre à cet enjeu ; c'est un outil de simulation multi-agents participative dont l'objectif est de sensibiliser les élus et la population au risque de submersion marine et à la notion de gestion équilibrée du risque.

2. Simulation participative pour la sensibilisation au risque de submersion

La simulation participative est une approche de simulation dans laquelle le ou les utilisateurs interagissent avec le monde virtuel simulé par l'ordinateur. Par extension, Guyot [GUY 06] définit la simulation multi-agents participative comme une simulation multi-agents avec laquelle les humains interagissent directement en contrôlant un des agents du système. La simulation multi-agents repose sur la modélisation d'un ensemble d'entités autonomes, appelés agents évoluant dans un environnement dynamique. Chaque agent a sa propre vision du système, son propre comportement, ses propres objectifs et sa propre façon d'interagir avec le système. Chaque agent est défini localement sans qu'il n'y est de contrôle global ; la complexité du système émerge alors de l'ensemble des interactions entre les agents. Les participants accèdent à la simulation comme le ferait un agent. La simulation participative appartient au domaine des jeux sérieux (ou selon le terme anglais plus fréquemment utilisé '*serious game'*). Un jeu sérieux est un jeu utilisé à d'autres fins que celle du seul divertissement ; il peut être utilisé pour l'apprentissage, l'entrainement ou la compréhension de mécanisme [MIC 06]. Le recours à des jeux sérieux pour l'acquisition de connaissances présentent plusieurs avantages par rapport aux approches classiques d'enseignement/sensibilisation (livre, article, wiki, etc.). Les jeux sérieux se placent dans une logique constructiviste (telle que proposée par Piaget [PIA 74]) dans laquelle l'apprenant (ici le joueur) construit sa connaissance en se confrontant à un problème (gestion du risque de submersion), via le monde simulé par l'ordinateur. Une méta-analyse regroupant 193 articles sur les jeux sérieux a permis de mettre en avant les avantages suivants [SAU 07] : le jeu sérieux favorise (a) le développement de relations sociales et humaines et des compétences de communication, (b) la motivation à l'apprentissage et soutient positivement l'estime et la confiance en soi, l'engagement et la persévérance, (c) le développement d'habiletés en résolution de problèmes, (d) la structuration, construction et la représentation des connaissances chez les apprenants et (e) l'intégration de l'information en développant la capacité à établir des liens, à transposer des connaissances acquises dans d'autres contextes, et ce, de manière intuitive ou non.

Les jeux sérieux sont particulièrement adaptés à la sensibilisation aux risques [CRO 16]. L'aspect simulation de la simulation participative est en ce sens très intéressant. En plaçant le joueur face à une situation risquée, et en lui permettant de tester différentes façons de lutter contre ces risques, cela peut lui permettre d'une part de mieux appréhender les conséquences des risques et leur possibilité d'occurrence et d'autre part, de comprendre les conséquences de ses actions. Il peut ainsi tester différentes stratégies et voir quels en serait les impacts. Face aux risques majeurs (comme l'est la submersion marine), cela peut permettre au joueur d'acquérir une expérience, simulée mais proche dans ses mécanismes du monde réel, qu'il lui serait difficile d'acquérir dans le monde réel dans un laps de temps court en raison du temps de retour important de l'aléa.

Les jeux sérieux doivent se baser sur un scenario intégré dans la conception du jeu et devant répondre à un objectif pédagogique [CHA 15]. De plus, le jeu (comme tout jeu, qu'il soit sérieux ou non, informatique ou non) doit être basé sur un ensemble de règles qui vont guider l'expérience du joueur. Les règles doivent spécifier les objectifs pour le joueur, les conditions de victoire et d'échec, les possibilités d'interaction du joueur avec le jeu et le cas échant avec les autres joueurs, et les mécanismes d'évolution du 'monde jeu' (c'est à dire, dans un contexte de simulation participative, la partie automatiquement simulée par l'ordinateur). Ces composantes seront soit intégrées au modèle informatique, soit fournies par un support externe (par exemple une fiche à consulter à certains moments du jeu) ; les deux modes étant complémentaires.

3. Modèle et jeu SPRITE

3.1. Principe et règles du jeu

SPRITE place le joueur dans le rôle du décideur politique ayant en charge la gestion territoriale de l'île d'Oléron. Le joueur est ici l'utilisateur de l'outil : il peut être un élu, un habitant de l'île ou simplement une

personne souhaitant acquérir de l'information quant au risque de submersion ou quant à la gestion d'un territoire insulaire. L'objectif du jeu est simple : le joueur a X années (X tours de jeu) pour obtenir les meilleurs résultats possibles sur chacun des objectifs de gestion (scores économique, environnemental, social et sécuritaire) ; la valeur de X est définie selon le scénario joué. Trois scénarii ont été intégrés dans le jeu ; ils sont classés par ordre de difficulté. Pour chacun d'entre eux, il y a une valeur X donnée ainsi que des occurrences de submersion (année à laquelle elles vont se produire), des conditions de défaite. De plus, le scénario peut influer sur des paramètres de jeu, tels que l'exigence des habitants de l'île ou la dégradation du milieu naturel après une submersion. Si, à n'importe quel tour de jeu, le joueur a un score trop faible sur l'un des objectifs (valeurs limites définies par le scénario), cela arrête la simulation avec un message de défaite. A chaque tour peut advenir ou non, une submersion marine entrainant des dommages sur l'île. Les variables du monde sont alors mises à jour et le joueur peut ensuite agir. Chaque action a un coût financier et le joueur peut en exécuter jusqu'à épuisement du budget. Le jeu utilise une monnaie virtuelle appelée '*kopec*' ; sa gestion est un point clef de la simulation car elle permet au joueur de faire des actions, mais les rentrées d'argent apportées par les impôts peuvent être source d'insatisfaction des habitants.

A la fin des X tours, le jeu s'achève et SPRITE donne le score du joueur. Le score du joueur est placé sur une échelle qualitative lui permettant d'en mesurer la portée. Cette échelle est dépendante du scénario ; par exemple dans le scénario '*jeu classique'*, un score de 100 correspond au qualificatif : '*score moyen'*, alors qu'un score de 125 correspond à '*bon score'*. Cette caractérisation permet au joueur de se rendre compte de la qualité de sa gestion et peut lui donner envie de rejouer pour améliorer son score. Ce dernier point est renforcé par la présence d'un tableau de 'High score' qui sera mis en ligne et permettra aux joueurs de se mesurer entre eux. Les notions d'évaluation et de compétition dans le jeu permettent d'augmenter la motivation du joueur et ainsi sa capacité à apprendre [KOS 05]. En plus du score global, SPRITE informe le joueur de son score sur chacun des objectifs et cela pour chaque année ; cela peut lui permettre de comprendre quelles ont été ses forces et faiblesses et à quel moment il a effectué des actions ayant entrainé des gains ou des pertes sur les scores. A la fin du jeu, le joueur peut consulter des fiches lui permettant de comprendre les mécanismes d'équilibre entre actions et objectifs ; ces connaissances délivrées sur un mode plus classique permettent de compléter le jeu. Le jeu est alors vu comme un facteur de motivation pour acquérir des connaissances [WOU 09].

3.2. Description des agents du modèle

Le modèle SPRITE contient 4 types d'agent (*Parcelle*, *Territoire*, *Joueur* et *Habitant*) auxquels s'ajoute un agent global (Monde). Leurs attributs et leurs processus sont exposés dans le diagramme de classe en Figure 2.

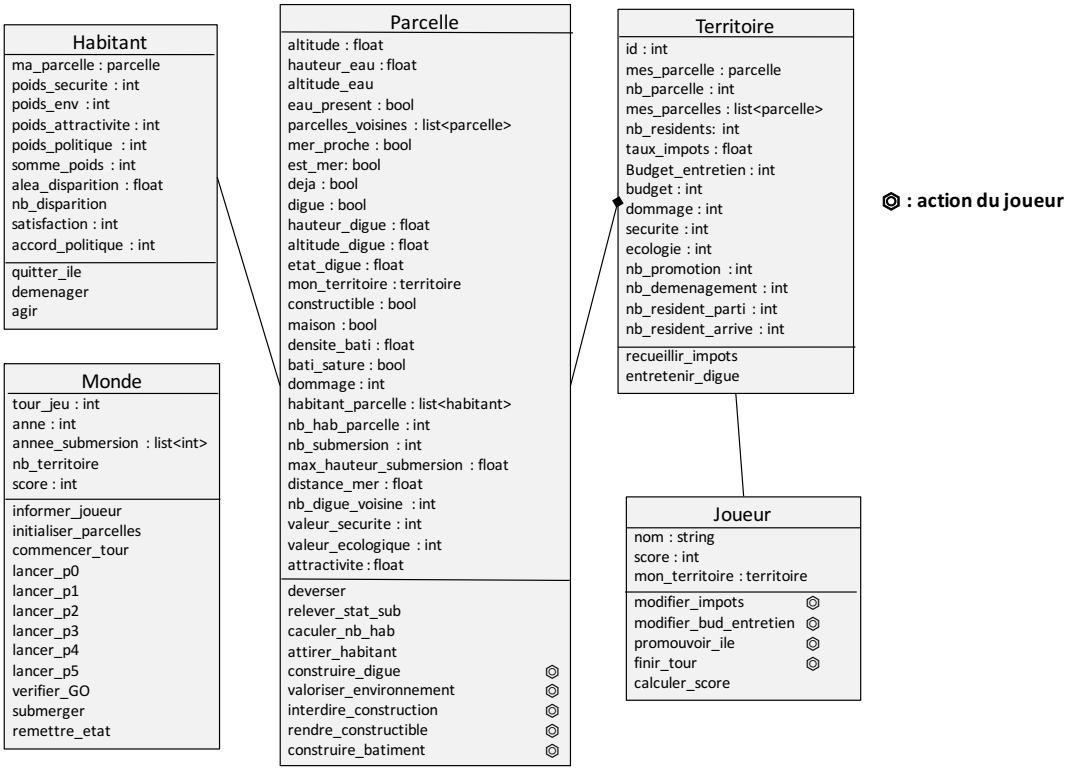


Figure 2. *Diagramme de classe du modèle SPRITE*

L'agent *Joueur* dispose de toutes actions de jeu ('*user_command*') permettant l'interaction avec le monde. L'agent *Habitant* est le seul agent autonome cognitif ; à chaque tour les agents *Habitant* (qui représente un groupe de 10 habitants de l'île) évaluent la situation et peuvent décider de déménager, de quitter l'île, etc. Les agents *Parcelle* et *Territoire* sont des agents géographiques qui portent les informations dimensionnelles de l'île et qui constituent le cadre du jeu (assimilable au plateau d'un jeu classique). A partir des données SIG de l'Ile d'Oléron (données planimétriques, altimétriques, etc.), SPRITE construit une grille de parcelles (Figure 3) ; afin de minimiser le temps d'initialisation du jeu, la construction de la grille de parcelle est effectuée via un module de SPRITE externe au programme principal et qui n'a besoin d'être effectué à chaque lancement du jeu. Les territoires sont composés d'un ensemble de parcelles ; on distingue le territoire marin du territoire de l'île.

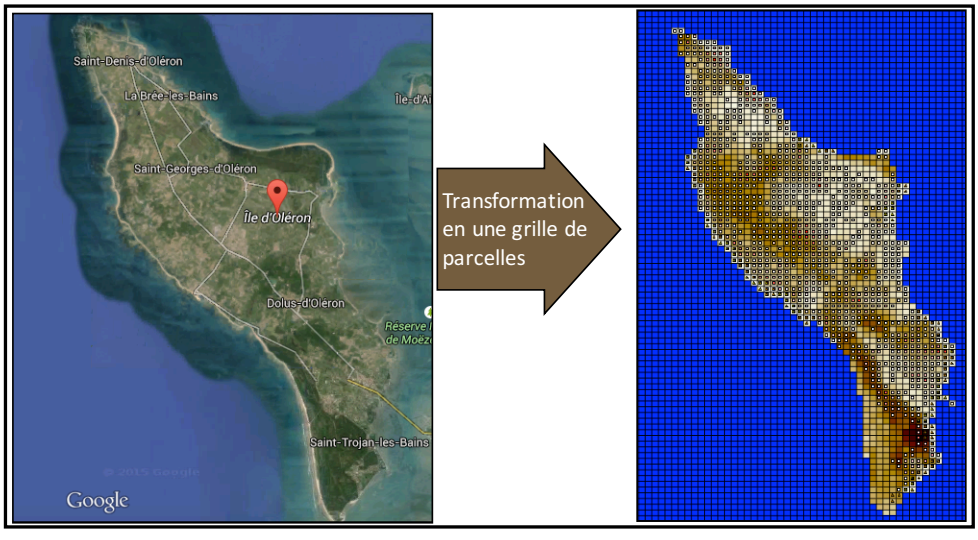


Figure 3. *De la carte au plateau de jeu*

3.3. Dynamique du système

Chaque tour de la simulation représente une année sur l'Ile d'Oléron et suit le même processus (Figure 4).

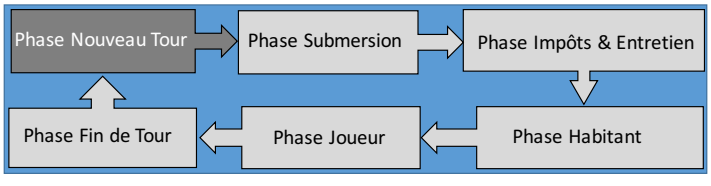


Figure 4. *Dynamique du système*

Phase Nouveau tour : L'année est incrémentée ; un message informe le joueur de l'année et éventuellement lui rappelle la fin imminente en cas de dernier tour.

Phase Submersion : Deux cas se présentent : soit une submersion est prévue à cette année et elle est alors simulée, soit il n'y a aucune submersion et on passe directement à la phase suivante. Les données d'entrées de la submersion sont la force du vent et sa direction, la pression météorologique et le coefficient de marée. A partir de ces données, la hauteur d'eau ainsi que la la hauteur de vague sont calculées à partir des modèles proposés par [LEC 15]. La submersion est alors simulée selon un algorithme de déversement présenté en Figure 5. Il y a deux types de transmissions : la transmission de l'eau par déversement (dans les 8 cases voisines, diagonales comprises) et la transmission par vague (seulement dans la direction *vent_vague* seulement). L'algorithme comporte en plus une règle sur la résistance et l'état des digues : la pression de l'eau ainsi que les vagues peuvent dégrader l'état des digues et ainsi les conduire à la rupture ; la distinction entre eau et vague est alors importante car elles ont chacune leur règle de dégradation des digues. Pendant sa phase de jeu, il faudra que le joueur accorde un certain budget pour leur entretien s'il souhaite qu'elles soient opérationnelles.

A la fin de la simulation de la submersion, SPRITE présente au joueur les zones impactées. Les dommages induits par la submersion sont calculés par parcelle puis sommés ; ils sont fonctions de la hauteur d'eau, du patrimoine bâti sur la parcelle ainsi que du nombre d'habitants. Ils sont traduits par un coût monétaire qui est retranché au budget du joueur ; un budget négatif signifie que le joueur est obligé de faire un prêt auprès des

banques pour payer les réparations. Un déficit important est un motif d'échec de la partie (critère économique). Les dommages vont avoir aussi des conséquences sur les habitants (satisfaction et sentiment de sécurité).

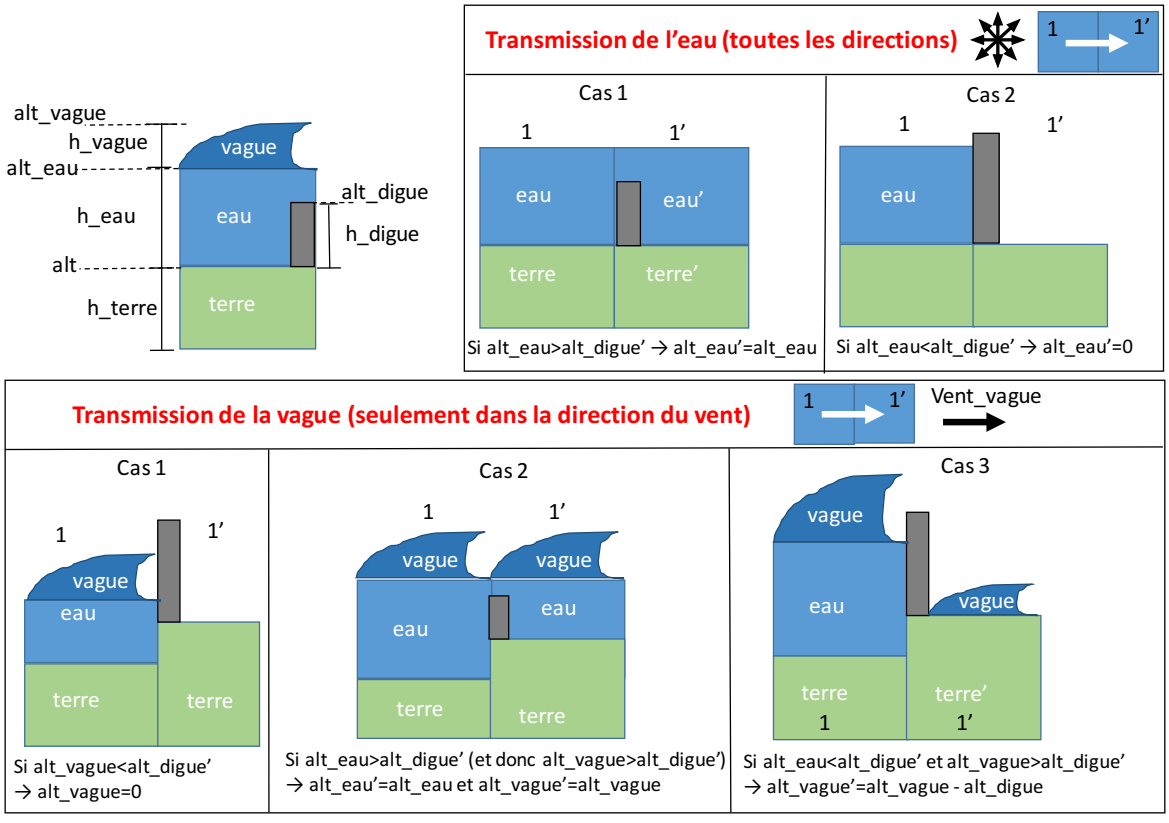


Figure 5. *Algorithme de submersion*

Phase Impôts et Entretien : Dans cette phase, les impôts sont récoltés pour chaque habitant ; ils dépendent du taux d'imposition qui est fixé par le joueur. Le montant récolté par les impôts est ajouté au budget du joueur. SPRITE attribue ensuite le budget de maintenance/entretien des digues pour la réparation de celles-ci ; plus ce budget sera élevé, plus l'état des digues pourra être restauré. Si le budget du joueur est inférieur à celui prévu pour l'entretien, celui-ci ne sera que partiellement exécuté.

Phase Habitant : Les habitants agissent dans cette phase. Ils peuvent choisir de ne rien faire, de déménager sur une autre zone de l'île (par exemple s'ils ne sentent pas en sécurité dans la zone qu'ils habitent actuellement) ou de quitter l'île (par exemple s'ils sont trop insatisfaits de la vie menée sur l'île). Durant cette phase de nouveaux habitants peuvent aussi arriver sur l'île. Il est à noter que dans le comportement des habitants, il a été intégré une part d'aléatoire ; par exemple un habitant très satisfait peut aussi être amené à quitter l'île, si par exemple, il a trouvé un emploi plus intéressant sur le continent. Les valeurs définissant la satisfaction ou le sentiment de sécurité des habitant évoluent dynamiquement pendant la simulation. Par exemple, un habitant exproprié (action du joueur) verra sa satisfaction descendre fortement.

Phase Joueur : C'est dans cette phase que le joueur peut effectuer des actions ; c'est la partie interactive de la simulation. Il peut effectuer autant d'action qu'il le souhaite dans la limite du budget disponible. Ils disposent de 5 actions au niveau des parcelles : Construire une digue (deux types possibles), Construire des bâtiments, Œuvrer pour la faune et la flore, Exproprier/Rendre inconstructible, Rendre constructible. Il dispose de plus de 3 actions globales : Promouvoir l'île, Modifier le taux d'imposition, Finir le tour (lorsqu'il juge qu'il n'a plus d'action à faire). Chaque action va entrainer des conséquences locales ou globales ; les actions ont généralement des aspects positifs et négatifs. Par exemple, augmenter les impôts va accroitre le budget disponible pour effectuer des actions les prochains tours, mais cela va réduire la satisfaction des habitants et l'attractivité de l'île.

Phase Fin de tour : Dans cette phase, SPRITE vérifie dans un premier temps les conditions de défaite. Si un indicateur est en dessous de la valeur seuil fixée par le scénario, le jeu s'arrête et SPRITE explique au joueur ce qui a entrainé son échec. Si le jeu arrive au bout du dernier tour (tel que défini par le scénario), le jeu s'arrête aussi, mais sur un message de victoire. Dans les deux cas, le joueur peut consulter les valeurs sur chaque critère

et pour chaque année jouée. Il a de plus accès à un ensemble de fiches lui permettant de comprendre les mécanismes d'équilibre qui régissent le jeu, et ainsi d'acquérir de la connaissance sur le risque de submersion et sur sa gestion.

3.4. Implémentation

Le modèle a été implémenté sous GAMA qui est une plateforme de modélisation et de simulation permettant de construire des simulations multi-agents spatialisées [GRI 13][TAI 14]. Elle propose un langage de programmation et un environnement de développement intégré permettant d'élaborer des modèles complexes (plusieurs millions d'agents). De plus, GAMA propose une gestion native des données SIG (Système d'Information Géographique) permettant d'intégrer dans les simulations des fichiers géographiques. Enfin elle dispose de fonctions permettant l'utilisation d'une dynamique participative indispensable pour le modèle SPRITE. La Figure 6 présente l'interface de jeu. Le plateau de jeu est présenté sous forme d'une grille de parcelles dont la couleur indique l'altitude (couleur foncée pour les altitudes le plus importantes). Les triangles représentent les digues (la couleur indique leur nature), les carrés formalisent les bâtiments (la couleur renvoie à la densité de bâti sur la parcelle) et les ronds correspondent à la population (densité indiquée par la couleur). Les actions s'effectuent au travers de la carte par un click droit donnant accès à une liste d'actions possible. Le click droit peut être effectué sur une parcelle pour effectuer une action qui la concerne directement (par exemple construire une digue dessus) ou sur un rond jaune en haut à gauche de la carte symbolisant le joueur et lui donnant accès aux actions globales (modification des impôts, campagne de promotion de l'île, etc.).

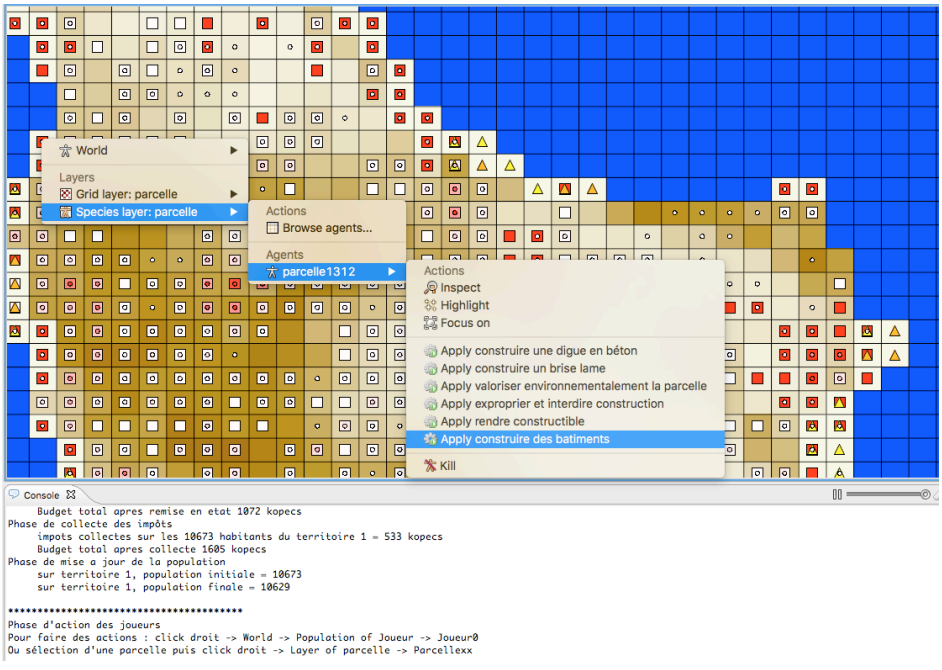


Figure 6. *Interface du jeu*

La console (en dessous de la carte sur la Figure 6) donne, durant tout le jeu, des informations au joueur (sur les commandes ou sur la situation de l'île).

4. Conclusion

Afin de sensibiliser les élus de la communauté urbaine d'Oléron et les habitants de l'île à la gestion du risque de submersion marine, nous avons proposé SPRITE, un outil de simulation participative. Il permet de placer l'utilisateur/joueur en tant que décideur lors d'un exercice de gestion avec la mission de définir un équilibre entre économie, popularité, sécurité et environnement. SPRITE a une double vocation pédagogique, en informant le joueur sur un aléa majeur mais souvent mal évalué, et d'autre part en lui donnant à réfléchir sur la politique de gestion de ce risque. Pour les élus, cela permet de leur donner des éléments de réflexion pour mettre en œuvre une stratégie efficace de gestion de ce risque et pour les habitants de comprendre la politique menée par la communauté urbaine/mairie. Le modèle qui a été implémenté sur GAMA est fonctionnel et le jeu est ainsi jouable. Il a été testé par un public hétérogène afin d'en calibrer les règles et l'équilibre. La capacité du jeu à faire apprendre/comprendre le joueur doit être évaluée ; dans ce but, une série d'expérimentations sera

prochainement menée. Ensuite, une version pourra être présentée aux habitants et élus de l'île d'Oléron ; cela constituera l'aboutissement de l'expérimentation de ce modèle.

5. Remerciements

Le modèle SPRITE a été développé par une équipe pluridisciplinaire dans le cadre d'un atelier de l'école thématique CNRS MAPS 8 (https://maps.hypotheses.org/evenements-maps-passes/maps-8), organisée par le réseau MAPS (Réseau thématique de modélisation multi-agents appliquée aux phénomènes spatialisés). SPRITE a servi de base de réflexion pour le projet LittoSim (AAP Défi Littoral CNRS 2015) porté par Nicolas Bécu et Marion Amalric. LittoSim est basé sur un nouveau modèle intégrant une logique multijoueur et affinant les concepts posés dans SPRITE.

6. Bibliographie

[BER 10] BERSANI C., DUMAS P., ROUZEAU M., GERARD F., GONDRAN O., HELIAS A., MARTIN X., PUECH P., FLEURY B., GREFF M., BOUGERE R., TREPOS Y., *Tempête Xynthia : retour d'expérience, évaluation et propositions d'action*, Ministère de l'écologie, du développement durable et de la mer, 2010.

[CHA 15] CHADLI A., Micro jeux et simulation multi-agents participative : apprentissage des procédures de lutte contre les rongeurs arvicoles, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2015.

[CRO 16] CROVATO S., PINTO A., GIARDULLO P., MASCARELLO G., NERESINI F., RAVAROTTO L., « Food safety and young consumers: Testing a serious game as a risk communication tool », *Food Control,* vol. 62, 2016. p.134-141.

[DUV 10] DUVAT-MAGNAN V., *Les impacts de la tempête Xynthia sur les plages de l'île d'Oléron : les réalités du terrain*, Institut du Littoral et de l'Environnement, 2010.

[GAR 10] GARNIER E., SURVILLE F., *La tempête Xynthia face à l'histoire. Submersions et tsunamis sur les littoraux français du Moyen Âge à nos jours*, Paris, Le Croît Vif, 2010.

[GRI 13] GRIGNARD A., TAILLANDIER P., GAUDOU B., « GAMA 1.6: Advancing the art of complex agent-based modeling and simulation », dans G. Boella, E. Elkind, B. T. R. Savarimuthu, F. Dignum, M. K. Purvis, editors, *PRIMA 2013*, vol. 8291 of Lecture Notes in Computer Science, Dunedin, New Zealand, Springer., 2013. p.117-131.

[GUY 06] GUYOT P., Simulations multi-agents participatives, Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 2006.

[KOS 05] KOSTER R., *A theory of fun for game design. Scottsdale*, Paraglyph Press, 2005.

[LEC 15] LE COZANNET G., ROHMER J., CAZENAVE A., IDIER D., VAN DE WAL R., DE WINTER R., PEDREROS R., BALOUIN Y., VINCHON C., OLIVEROS C. « Evaluating uncertainties of future marine flooding occurrence as sea-level rises », *Environmental Modelling & Software*, vol. 73, 2015, p. 44-56.

[MIC 06] MICHAEL D., CHEN S., *Serious games: Games that educate, train, and inform*. Boston, MA.: Thomson Course Technology, 2006.

[PIA 74] PIAGET J., *La prise de conscience*. Paris, PUF, 1974.

[SAU 07] SAUVE L., RENAUD L., GAUVIN M., « Une analyse des écrits sur les impacts du jeu sur l'apprentissage, Revue des Sciences de l'Éducation », *Revue des sciences de l'éducation,* vol. 33, n°1, 2007, p. 89-107.

[TAI 14] TAILLANDIER P., GRIGNARD A., GAUDOU B., « Des données géographiques à la simulation à base d'agents : application de la plate-forme GAMA », *Cybergeo : European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, vol. 671, URL : http://cybergeo.revues.org/26263, 2014.

[UNI 16] UNIVERSITE DE LA ROCHELLE, *L'Île d'Oléron face aux risques de submersion et d'érosion marine*, url : http://websig.univ-lr.fr/oleron_test/flash/, 2016.

[VIN 12] VINET F., DEFOSSEZ S., REY T., BOISSIER L., « Le processus de production du risque « submersion marine » en zone littorale : l'exemple des territoires Xynthia », *NOROIS*, vol. 222, 2012, p. 11-26.

[VEN 10] VENT PORTANT, « Xynthia : le bilan », *Vent Portant*, vol. 25, 2010, p. 3-5.

[WOU 09] WOUTERS P., SPEK E.D., OOSTENDORP H.V., « Current Practices in Serious Game Research: A Review from a Learning Outcomes Perspective », *Games-Based Learning Advancements for Multi-Sensory Human Computer Interfaces: Techniques and Effective Practices*. C. Thomas, S. Mark and B. Liz. Hershey, PA, USA, IGI Global, 2009, p. 232-250.

La distribution par des véhicules électriques

Bay M.[1], Limbourg S.[2]

[1] *University de Liège, HEC Liège, QuantOM, Rue Louvrex 14, 4000 Liège, Belgique Maud.Bay@ulg.ac.be*

[2] *University de Liège, HEC Liège, QuantOM, Rue Louvrex 14, 4000 Liège, Belgique Sabine.Limbourg@ulg.ac.be*

RÉSUMÉ. *L'objectif des problèmes de tournées de véhicules est la conception d'itinéraires efficaces pour fournir des biens d'un dépôt à un ensemble de clients satisfaisant des contraintes spécifiques. Les variantes classiques de ces problèmes considèrent que les routes sont effectuées par des véhicules alimentés par des moteurs à combustion interne. Ces véhicules ont une grande autonomie, le réseau d'approvisionnement est dense et le temps nécessaire au ravitaillement peut être négligé. En revanche, en raison d'une plus petite autonomie, du temps nécessaire pour recharger la batterie des véhicules électriques (VE) et de la disponibilité limitée des infrastructures de recharge, les algorithmes de tournées de VE doivent être développés. Maximiser l'autonomie entre deux recharges conduit à examiner les principaux facteurs de consommation d'énergie qui sont : le poids du véhicule et sa charge, l'efficacité du moteur, la vitesse, la conduite, la pente de la route et les possibilités de recharge du véhicule pendant la conduite. Les résultats de cette recherche permettront la gestion optimale de la logistique urbaine où la livraison de nuit, rendue possible par l'usage de ces véhicules silencieux, reste un des grands intérêts.*

ABSTRACT. *The objective of vehicle routing problems is to design a set of efficient vehicle routes to provide goods from a depot to a set of customers satisfying specific constraints. Classical variants of these problems consider that routes are performed by internal combustion engine vehicles. These vehicles have a long and easy-to-restore driving range. However, due to the short driving range, long battery recharging times and the limited availability of charging infrastructure, routing algorithms for EV need to be developped. Maximizing the driving range of the vehicle leads to an examination of the main factors in energy consumption which are: the mass of the vehicle and its payload, engine efficiency, vehicle speed, the drive pattern, road grade, and vehicle recharge ability while driving. Results from this research will provide an optimal management of urban logistics where night delivery, through the use of those silent vehicles, remains one of the main benefits.*

MOTS-CLÉS : *Véhicules électriques, minimisation de l'énergie, distribution durable, gestion de la batterie, problème du voyageur de commerce*

KEYWORDS: *Electric vehicles, energy minimization, sustainable distribution, battery management, Travelling salesman problem*

1. Introduction

Le livre blanc sur les transports [COM 11], adopté par la Commission européenne, présente une feuille de route pour un système de transport européen plus compétitif et durable. L'un des objectifs est de parvenir à une logistique sans CO_2 dans les grands centres urbains en 2030 par le développement et le déploiement de carburants et des systèmes de propulsion nouveaux et durables. La suppression progressive des véhicules alimentés par des moteurs à combustion interne de l'environnement urbain contribue à réduire la dépendance au pétrole, les émissions de gaz à effet de serre, la pollution atmosphérique et le bruit.
Les problèmes de tournées de véhicules peuvent être décrits comme un problème de conception d'itinéraires efficaces pour fournir des biens d'un dépôt à un ensemble de clients satisfaisant des contraintes spécifiques. D'un point de vue économique, l'application de techniques d'optimisation pour résoudre ces problèmes a conduit à des économies allant de 5% à 20% des coûts de transport aux USA et dans l'UE [TOT 01]. De même, les avantages environnementaux ont été remarquables en contribuant à réduire la congestion et le bruit généré par le transport de marchandises.
En raison d'une plus petite autonomie, du temps nécessaire pour recharger la batterie des véhicules électriques (VE) et de la disponibilité limitée des infrastructures de recharge, les algorithmes de tournées de VE doivent être développés. Maximiser l'autonomie entre deux recharges, ou le niveau d'énergie (état de charge de la batterie) à destination, conduit à examiner les principaux facteurs de consommation d'énergie qui sont : le poids du véhicule et sa charge, l'efficacité du moteur, la vitesse, la conduite, la pente de la route et les possibilités de recharge du véhicule pendant la conduite, comme la capture de l'énergie cinétique sur les chemins de descente ([BEK 11]). Les résultats de cette recherche permettront la gestion optimale de la logistique du dernier kilomètre dans des zones urbaines où la livraison de nuit (tôt le matin ou tard le soir), rendue possible par l'usage de ces véhicules silencieux, reste un des grands intérêts.
L'objectif est donc de déterminer la route consommant le moins d'énergie plutôt que la plus courte (ou la moins coûteuse). Toutefois, puisque le développement des véhicules électriques est récent, l'adaptation des problèmes de routage aux caractéristiques de VE est encore rare. [PEL 16] présentent une revue de la littérature sur les recherches dans ce domaine.
Notre papier se concentre sur le problème du voyageur de commerce (Travelling salesman problem en anglais) pour un VE (E-TSP) : étant donnés n clients, l'objectif est de trouver le cycle hamiltonien qui maximise le niveau d'énergie disponible à la fin de la tournée sachant qu'il n'y a pas de recharge. Cet objectif maximise l'autonomie du véhicule alors que le problème classique détermine un plus court chemin qui visite chaque client une et une seule fois et qui retourne au dépôt de départ. C'est un défi algorithmique, puisque les coûts de l'énergie peuvent être négatifs en raison de la capture d'énergie cinétique sur les chemins de descente et que la capacité de la batterie est limitée. La section 2 présente la formulation mathématique, la section 3 discute des premiers résultats avant de conclure.

2. Formulation mathématique

L'E-TSP est défini sur un graphe complet $G = (N, A)$ où N est l'ensemble des nœuds indexés par $i, j \in \{0, \ldots, n+1\}$ et $A = \{(i,j) : i, j \in N, i \neq j\}$ est l'ensemble des arcs. L'ensemble $N \setminus \{0, n+1\}$ dénote la localisation des clients tandis que le dépôt unique est dupliqué en un dépôt origine, identifié comme noeud 0 lorsque le véhicule commence sa tournée, et un dépôt destination, identifié comme nœud $n+1$, où le véhicule termine sa tournée. Une tournée devient ainsi un chemin hamiltonien à partir de 0 et se terminant à $n+1$.
Une distance d_{ij}, un angle correspondant à la pente de la route θ_{ij} et une vitesse limite $\left[v_{ij}^{min}, v_{ij}^{max}\right]$ sont associés à tous $(i,j) \in A$. Le temps de parcours du véhicule est limité à T. L'énergie dépensée ou récupéré, e_{ij}, pour parcourir un arc $(i,j) \in A$ est égale à la puissance totale p_{ij} déployé (resp. capturé) moins la puissance p_{ij}^{aux} utilisée pour les appareils auxiliaires (tels que l'air conditionné). La demande de chaque client $i \in N$ est représentée par q_i et il n'y a pas de demande du dépôt ($q_0 = q_{n+1} = 0$). Un véhicule, initialement situé au dépôt, a des capacités suffisante de chargement et de batterie pour trouver un itinéraire satisfaisant toutes les demandes.
Le niveau de la batterie ne dépasse jamais la capacité maximale, C, et doit toujours être non négative puisque la batterie ne peut pas être déchargée en dessous de zéro. Les paramètres techniques du véhicule et le modèle de consommation d'énergie sont donnés. La tournée commence et se termine au dépôt ; et chaque client est visité une fois exactement. L'objectif de l'E-TSP est de maximiser le niveau L de l'énergie disponible (ou état de charge de la batterie) à la fin de la tournée. Au début de la tournée, le niveau disponible d'énergie L_0 est connu. Le niveau d'énergie est limité par la capacité maximale de la batterie et ne la dépasse jamais même si plus d'énergie pourrait

être disponible grâce à la récupération. Comme, le niveau L_j d'énergie disponible à chaque noeud $j \in N$ ne peut pas tomber en dessous de zéro ; le niveau d'énergie peut être calculée comme suit :

$$L_j = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{i=0}^{n}(L_i - e_{ij})\, x_{ij} \leq 0 \\ C & \text{if } \sum_{i=0}^{n}(L_i - e_{ij})\, x_{ij} \geq C \\ \sum_{i=0}^{n}(L_i - e_{ij})\, x_{ij} & \text{otherwise.} \end{cases}$$

et le modèle mathématique du E-TSP :

Maximize L_{n+1} (1)

subject to :

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{ij} = 1 \; \forall i \in N \setminus \{n+1\} \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^{n} x_{ij} = 1 \; \forall j \in N \setminus \{0\} \quad (3)$$

$$u_0 = 1; u_{n+1} = n+2 \quad (4)$$

$$1 \leq u_i \leq n+2 \; \forall i \in N \quad (5)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (n+1)(1 - x_{ij}) \; \forall i \in N, j \in N \setminus \{0\} \quad (6)$$

$$y_{ij}^{l} \leq x_{ij} \; \forall i, j, l \in N \quad (7)$$

$$y_{il}^{l} \geq x_{il} \; \forall i \in N, l \in N \setminus \{0\} \quad (8)$$

$$u_j - u_l + y_{ij}^{l}\,(n+1) + (1 - x_{ij})\, 2(n+1) \geq 0 \; \forall i, j, l \in N \quad (9)$$

$$u_j - u_l - (1 - y_{ij})^{l}\,(n+1) - (1 - x_{ij})\, 2(n+1) \leq 0 \; \forall i, j, l \in N \quad (10)$$

$$0 \leq L_i \leq C \; \forall i \in N \quad (11)$$

$$L_j = \sum_{i=0}^{n}(L_i - e_{ij})\, x_{ij} - s_j \; \forall j \in N \quad (12)$$

$$e_{ij} = (p_{ij} + p_{ij}^{aux})\, \frac{d_{ij}}{v_{ij}} \; \forall (i,j) \in A \quad (13)$$

$$p_{ij} = M_{ij}\, g\, v_{ij}\, sin\theta_{ij} \; + \; 0.5\, c_d\, \rho\, A\, v_{ij}^{3} \; + \; c_r\, M_{ij}\, g\, v_{ij}\, cos\theta_{ij} \; \forall (i,j) \in A \quad (14)$$

$$\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{n+1} x_{ij}\, \frac{d_{ij}}{v_{ij}} \leq T \quad (15)$$

$$v_{min} \leq v_{ij} \leq v_{max} \; \forall (i,j) \in A \quad (16)$$

$$x_{ij}, y_{ij}^{l} \in \{0,1\} \; \forall i, j, l \in N \quad (17)$$

$$u_i \in N, s_j \in R_+ \; \forall i \in N, \forall j \in N \quad (18)$$

La fonction objectif (1) consiste à maximiser le niveau d'énergie disponible à la fin de la tournée. Les contraintes (2) indiquent que le véhicule quitte chaque nœud i exactement une fois, et les contraintes (3) qu'un véhicule arrive à un nœuds j exactement une fois. Les contraintes (4)-(6) veillent à exclure les tournées n'incluant pas tous les nœuds en utilisant les variables entières $u_i,\ i \in N$, qui déterminent le numéro de séquence dans laquelle le nœuds i est visité comme dans la formulation de Miller-Tucker-Zemlin [MIL 60]. Les contraintes (4) garantissent que les nœuds de départ et d'arrivée sont le dépôt. Les contraintes (5) assurent que, pour chaque noeud i, à l'exclusion du dépôt, la variable entière u_i est comprise entre 2 et $n+1$. Les contraintes (6) définissent l'ordre de visite de chaque nœuds : si $x_{ij} = 1$, le nœuds suivant j doit satisfaire aux contraintes $u_j \geq u_i + 1$; sinon si $x_{ij} = 0$, les contraintes (6) deviennent $u_i - u_j \leq n-1$ ce qui est toujours satisfait si $2 \leq u_j$ et $u_i \leq n+1$. Les contraintes (7)

garantissent que si $x_{ij} = 0$ (c'est-à-dire que l'arc (i, j) n'est pas dans la tournée) alors il n'y a pas de chargement transporté sur cet arc : $y^l_{ij} = 0$. Sinon, si $x_{ij} = 1$, les contraintes (8) et (9) imposent que $y^l_{ij} = 1$ pour tous les arcs (i, j) tels que $u_l \geq u_j$. Notons que pour les nœuds déjà visités, $u_l < u_j,\ y^l_{ij} = 0$ en raison de (10). Les contraintes relatives au niveau de charge de la batterie (11)-(12) impliquent que ce niveau, L_i, ne peut pas être inférieur à zéro ni exceder la capacité de la batterie, s_j est une variable d'écart non negative qui permet d'inclure les arcs pour lesquels le gain d'énergie seraient trop important par rapport à la capacité de la batterie, en n'effectuant pas de stockage au-delà de cette limite. Puisque la fonction d'énergie est monotone sur chaque arc, les contraintes au niveau de chaque noeud impliquent que cette propriété est valide sur tout le parcours d'un arc. Les contraintes (13) representent l'énergie e_{ij} requise (resp. produite) quand le véhicule parcourt l'arc, et les contraints (14) définissent la puissance p_{ij} nécessaire pour vaincre la gravité, la traînée et la force de résistance au roulement ([BEK 11]), p_{ij} est negative lorsque l'énergie est récupérée. Dans ce modèle, nous considérons que la vitesse est constante sur un arc (accélération est nulle). Dans l'équation (14), $M_{ij} = M_E + \sum_{l=1}^{n} q_l\ y^l_{ij}$ est la masse du véhicule (en kg), c'est-à-dire masse de véhicule vide, M_E, plus les quantités transportées sur l'arc (i, j) ; g est la constante gravitationnelle ($9.81 m/s^2$), ρ est la densité de l'air (kg/m^3), A est la surface frontale du véhicule (en m^2), c_r et c_d sont les coefficients adimensionnels de résistance au roulement et de la traînée, respectivement. Comme dans le modèle développé par [BEK 11] tous les paramètres sont constants sur un arc donné, mais la charge et la vitesse peuvent varier d'un arc à l'autre. La contrainte (15) assure que le temps de parcours maximum ne soit pas dépassé. Les contraintes (16) définissent les bornes inférieures et supérieures pour la vitesse sur chaque arc. Finalement, les contraintes (17)-(18) sont les conditions binaires et de non-négativité sur les variables.
La formulation mathématique conduit à un modèle non linéaire avec des variables mixtes (discrètes et continues). En effet, les variables de décision utilisées dans la formulation sont un ensemble de variables binaires x_{ij} égales à 1 si et seulement si l'arc (i, j) est dans la tournée ; un ensemble de variables binaires $y^l_{ij} = 1$ si et seulement si l'arc (i, j) est dans la tournée et la demande du client l, q_l, transportée sur cet arc ; et un ensemble de variables v_{ij}, associées à la vitesse du véhicule sur l'arc (i, j), qui vont de v_{min} à v_{max}. Le niveau d'énergie disponible est défini à l'aide d'un modèle de consommation d'énergie proposé et testé dans la littérature ([BEK 11]) dans lequel le poids du véhicule, la vitesse et la pente de la route sont considérés.

3. Résultats

Pour résoudre notre modèle de programmation non linéaire en variables mixtes, l'algorithme de décomposition par Outer Approximation initialement proposé par [DUR 86] est utilisé grâce à l'outil d'optimisation AIMMS, un acronyme pour Advanced Interactive Multidimensional Modeling System. Dans [POL 15], une synthèse des instances de référence sur les problèmes de routage avec des contraintes de chargement est fournie. Pour chaque instance, les références des articles qui les utilisent et le lien vers le site sont donnés. Comme nous sommes les premiers à étudier E-TSP avec des contraintes de chargement et la prise en compte de la pente, de nouvelles instances de référence ont été générées. Les distances entre les clients, l'élévation de différents endroits et la pente ont été prises en compte pour assurer la cohérence de l'ensemble de données. Aussi des valeurs réalistes ont été choisies pour les caractéristiques du véhicule utilitaire : $M_E = 2220$ kg, la charge utile est 770 kg, les coefficients aérodynamiques ($A = 3.2\ m^2$, $c_r = 0.015$, $c_d = 0.4$ et $\rho = 1.225\ kg/m^3$), $C = L_0 = 24$ kwh, $p^{aux}_{ij} = 1000\ W\ \ \forall i, j \in N$. Nous supposons que la valeur minimale de la vitesse est $5\ m/s = 18\ km/h$ et que la valeur maximale de la vitesse est $33.33\ m/s \approx 120\ km/h$.

Une pratique de plus en plus courrante en logistique urbaine est la création de centres de consolidation urbains (CCU) pour traiter le problème de livraison du dernier kilomètre. Les CCU sont situés à proximité de la zone urbaine et fonctionnent comme une jonction entre les zones urbaines et interurbaines dans la chaîne de transport. Le tableau 1 reprend le dépôt, localisé à la rue Ernest Solvay et 5 clients. La figure 1 représente la tournée optimale qui a une distance de $16.992\ km$, lorsque chaque client a une demande de $10\ kg$. Les évolutions de la vitesse et du niveau de la batterie en fonction de la limite de temps sont représentées à la figure 2.

Dans ce qui suit, l'impact de la variation de la quantité à transporter est examinée. Nous supposons que chaque client a toujours une demande de $10\ kg$ sauf un client qui a une demande de $700\ kg$. Dans le cas 1, $700\ kg$ doivent être transportés au Sart Tilman, dans le cas 2 à Tilff, le cas 3 à Embourg, le cas 4 à Magotteaux et le cas 5 à Belle-ile. Dans tous ces cas, la vitesse optimale est de $50.98\ km/h$ pour une limite de temps de parcours fixé à 1200s. Le routage optimal pour les cas 3, 4 et 5 sont identiques à la figure 1 tandis que le routage optimal pour les cas 1 et 2 est représenté à la figure 3. La figure 4 représente les évolutions du niveau de batterie le long de chaque itinéraire pour chaque cas. Notons qu'il y a une récupération d'énergie entre Embourg et Magotteaux pour les cas 1 et 2 et entre le Sart Tilman et le dépôt dans les autres cas.

Tableau 1. *Centres de consolidation urbains : CCU case.*

Name	Latitude	Longitude	Elévation (m)	Chargement (kg)
Rue E. Solvay (Depot)	50.610059	5.564638	65	0
Belle-ile	50.615870	5.593285	72	10
Tilff	50.563340	5.595421	177	10
Embourg	5 50.591451	5.617160	188	10
Magotteaux	50.603652	5.640281	112	10
Sart Tilman	50.57819	5.57965	213	10

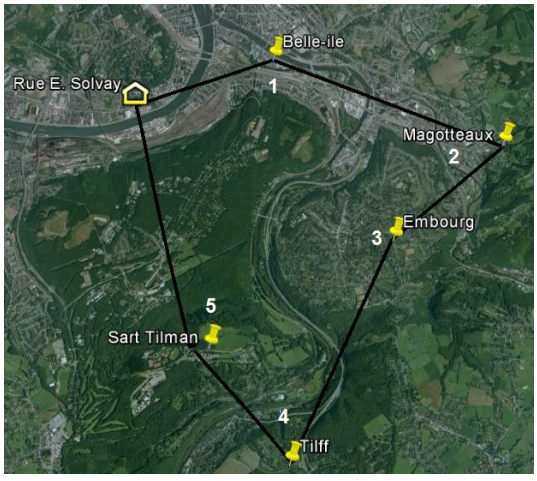


Figure 1. *CCU : routage optimal lorsque chaque client a une demande de 10 kg.*

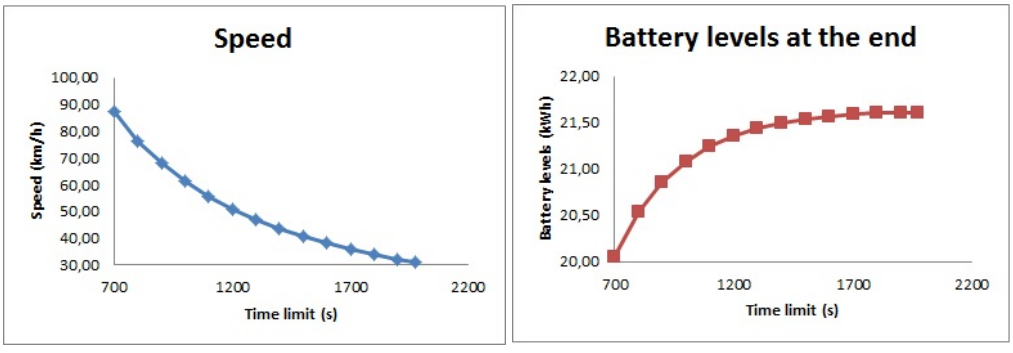


Figure 2. *Vitesse et niveau de la batterie*

4. Conclusions

Cet article présente un nouveau modèle de TSP utilisant des véhicules électriques. Le problème est de livrer chaque client et d'optimiser l'état de charge de la batterie à la fin de la tournée. Puisque le temps nécessaire au chargement de la batterie est important, cette opération est interdite pendant le routage dans notre modèle. Une caractéristique importante de notre approche est que la formulation générique ne se limite pas à un type spécifique de véhicules.

Afin de tester le modèle, de petites instances représentent des cas réels. Les distances entre les clients, l'élévation de différents endroits et la pente des routes ont été prises en compte. Le but est de vérifier la validité du modèle et d'obtenir des indications utiles pour le développement d'algorithmes pour des problèmes réalistes de grande taille.

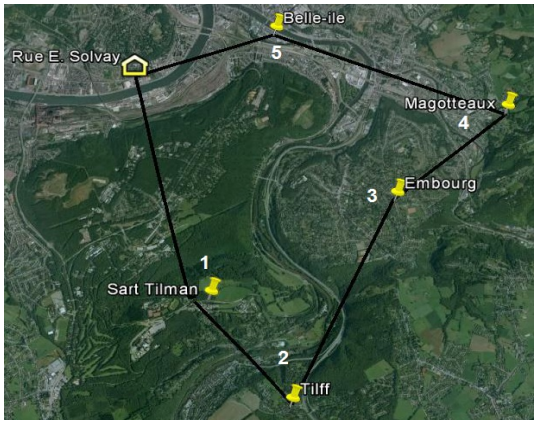


Figure 3. *Cas : Tilff, Sart Tilman.*

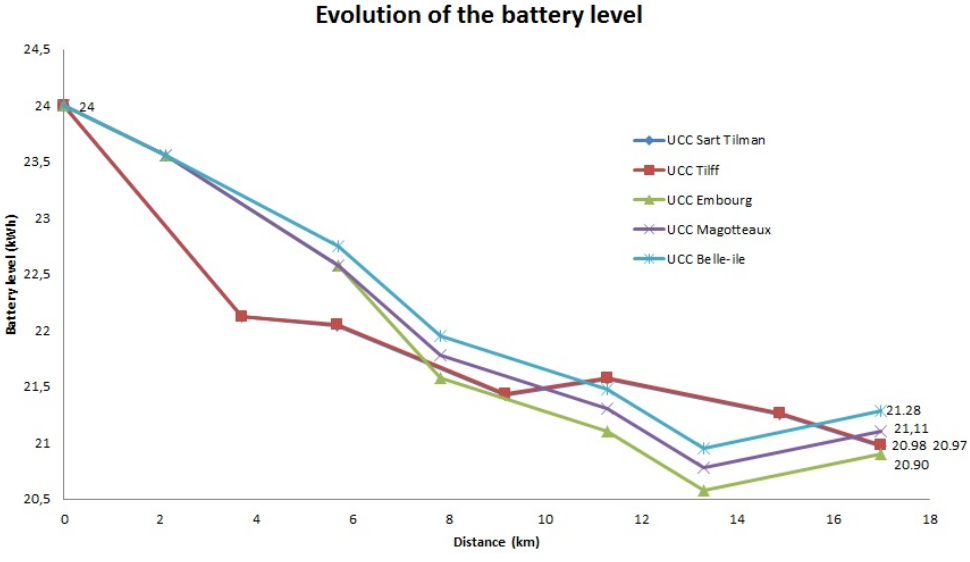


Figure 4. *Evolutions du niveau de la batterie pendant la tournée pour chaque cas.*

Les résultats de ce modèle peuvent contribuer à améliorer l'environnement urbain et la mobilité des villes. Les chemins optimaux obtenus permettent de réduire la consommation d'énergie et d'avoir la recharge la plus efficace du véhicule pendant la conduite. De plus, les demandes plus lourdes sont déchargées en priorité tandis que les demandes plus légères sont déchargées plus tard. Une vitesse plus lente permettra de réduire la congestion sur les routes, le nombre d'accidents et leur gravité.

Les résultats peuvent également fournir de l'aide dans le processus de prise de décision. Par exemple, l'élévation de l'emplacement du dépôt ne devrait pas être trop élevé car il est probable que, au début de la tournée, le niveau d'énergie soit à la capacité maximale. En outre, certaines rues ou routes seront souvent prises dans une direction spécifique au profit, par exemple de la pente de descente. Cela peut être un support pour déterminer les rues à sens unique.

Une étude réalisée par [PEL 16] révèle que les véhicules électriques sont appropriés pour les arrêts fréquents car ils ont système de récupération d'énergie au freinage, des longueurs de route restreintes et de faibles vitesses de déplacement. La réduction de la pollution et du bruit sont également des facteurs pertinents qui encouragent l'utilisation de véhicules électriques dans les zones urbaines.

Remerciements

Ce projet a été partiellement financé par le pôle d'attraction interuniversitaire initié par la Politique scientifique fédérale (subvention P7/36). Ce article, cependant, n'exprime que le point de vue des auteurs.

5. Bibliographie

[BEK 11] BEKTAŞ T., LAPORTE G., « The Pollution-Routing Problem », *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 45, n° 8, p. 1232 - 1250, 2011, Supply chain disruption and risk management.

[COM 11] COMMISSION E., *White Paper - Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and Resource Efficient Transport System"*, 2011.

[DUR 86] DURAN M. A., GROSSMANN I. E., « An outer-approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs », *Mathematical Programming*, vol. 36, n° 3, p. 307–339, 1986.

[MIL 60] MILLER C. E., TUCKER A. W., ZEMLIN R. A., « Integer programming formulations and traveling salesman problems », *J. ACM*, vol. 7, p. 326 - 329, 1960.

[PEL 16] PELLETIER S., JABALI O., LAPORTE G., « 50th Anniversary Invited Article—Goods Distribution with Electric Vehicles : Review and Research Perspectives », *Transportation Science*, vol. 50, n° 1, p. 3-22, 2016.

[POL 15] POLLARIS H., BRAEKERS K., CARIS A., JANSSENS G. K., LIMBOURG S., « Vehicle routing problems with loading constraints : state-of-the-art and future directions », *OR Spectrum*, vol. 37, n° 2, p. 297–330, Springer Berlin Heidelberg, 2015.

[TOT 01] TOTH P., VIGO D., « The Vehicle Routing Problem », chapitre An Overview of Vehicle Routing Problems, p. 1–26, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA, 2001.

Une analyse dynamique des interactions entre acteurs portuaires et leurs effets sur l'efficience d'un port pétrolier

Emna Belaid[1], Philippe Rigo [2], Mario Cools [3]

[1]*Université de Liège, Département ArGEnCo, mail : ebelaid@ulg.ac.be*
[2]*Université de Liège, Département ArGEnCo, mail : ph.rigo@ulg.ac.be*
[3]*Université de Liège, Département ArGEnCo, mail : mario.cools@ulg.ac.be*

RÉSUMÉ. *Le port est une entité hétérogène qui regroupe un ensemble d'acteurs dont les objectifs sont parfois contradictoires. L'analyse de leurs interactions permet de comprendre le mécanisme qui régit la gestion portuaire. Ce mécanisme influence la performance du port. Dans cet article, nous analysons l'efficience portuaire selon un modèle dynamique. Ce dernier est basé sur un cadre conceptuel établi selon une analyse systémique. Les simulations effectuées montrent que les paramètres « vitesse de chargement » et « dimension du connecteur » sont les paramètres les plus influents. L'investissement dans des nouvelles installations pour le port de La Skhira (Sfax, Tunisie) est notre principale recommandation.*

ABSTRACT. *The port is a heterogeneous entity which includes a set of actors whose objectives are sometimes contradictory. The analysis of their interactions allows us to understand the mechanism that governs the port management. This mechanism influences the port performance. In this article, we analyze port efficiency as a dynamic model. The latter is based on a framework established by a systemic analysis. From the simulations performed, it may be concluded that the parameters "loading rate" and "Connector dimension" are the most important parameters. Investment in new facilities for the port of La Skhira (Sfax, Tunisia) is our main recommendation.*

MOTS CLES: Port, Pétrole, efficience, optimisation, dynamique, simulation.
KEYWORDS: Sea-port, Crude Oil, efficiency, optimization, dynamic, simulation

1. Introduction

Le port a été considéré, pendant longtemps, comme une porte d'entrée qui permet le transfert de marchandises et de passagers [1]–[3]. Grâce à la mondialisation, il est devenu un nœud logistique et industriel qui appartient à un système global de transport [2].

Son attractivité est déterminée par la performance de ses activités structurelle et managériale[4]. Son efficience est analysée, en grande majorité, grâce aux techniques d'analyse d'Enveloppement des Données (DEA) et ses dérivées [5]. L'objectif est de la quantifier en mesurant les inputs et les outputs des ports « *en fonction de sa distance avec les frontières de la production*» [5].

Son effet socio-économique est analysé selon une approche agrégée dont la valeur ajoutée, le taux d'employabilité, l'investissement et le tonnage sont les indicateurs [1], [6]. Utilisée principalement dans les rapports de [7], [6] critiquent cette méthode et proposent une analyse désagrégée qui se base sur les relations des acteurs portuaires et dont l'objectif est de mesurer la retombée économique du port sur le plan régional. Ces acteurs sont par la suite attribués à des zones géographiques, les situant en dehors et au sein du périmètre portuaire. Ils sont aussi classés en « acteurs portuaires » et «acteurs non portuaires ». Cette catégorisation reprend la définition de la position concurrentielle d'un port de [1], [8] qui identifient une concurrence interportuaire et intra-portuaire.

Assurer une place sur le marché régional, national et mondial, est par conséquent un défi majeur dont le rôle de l'autorité portuaire est d'assurer un niveau de productivité adéquat aux attentes des usagers direct et indirect du port [9]. Elle est confrontée non seulement aux problèmes d'ordre technique, technologique et organisationnel mais aussi d'ordre relationnel.

En effet, le périmètre portuaire englobe une panoplie d'acteurs qui interagissent dans le but de satisfaire une demande de transport [8], [10]. Ils sont, cependant, soumis aux règlements internes et à la fluctuation de l'environnement dans lequel ils opèrent.

Ces études analysent principalement les ports à conteneurs et peu d'entre elles ou aucune, n'a examiné, à nos connaissances, le cas d'un port pétrolier. De plus elles se basent exclusivement sur les données économiques et négligent l'aspect dynamique de l'évolution portuaire.

Ce papier cherche à analyser l'efficience portuaire à travers l'analyse du comportement global du système portuaire. L'objectif est de recenser les paramètres les plus importants. Ainsi, nous avons effectué une analyse dont l'objet est de mettre en relief les contraintes de la gestion de la chaîne logistique portuaire. L'analyse commence par décortiquer la chaîne logistique en système et analyser l'évolution de son comportement dans une perspective dynamique. Elle aboutit à déterminer la sensibilité de l'efficience portuaire à travers l'indicateur « temps passé au port». La contribution de ce papier est de présenter une méthode innovante et complète pour l'analyse de la gestion portuaire. Elle est une analyse multi-niveaux et suit la logique « agrégée-désagrégée ».

2. Méthodologie

Basée sur une vision globale, la démarche d'analyse intègre l'approche systémique « AS » [11], l'approche des parties prenantes « APP » [12] et la dynamique des systèmes « DS » [13][14].

L'AS est née du besoin à résoudre les problèmes complexes [15] [16] et de combler les lacunes de la pensée analytique. La DS a émergé afin de quantifier les relations que l'AS met en évidence. L'APP a vu le jour dans le but de résoudre les problèmes de création de valeur, d'éthique et de gestion [17]. Ces approches ont été appliquées dans plusieurs domaines dont le management stratégique [18]–[21] et le management des affaires [17], [22].

Bien que la DS est associée à la AS [16], l'APP est rarement mentionnée explicitement lors de l'analyse systémique. [18] soulève que l'AS est un moyen d'appréhender les acteurs. [23] utilisent le Soft Systems Methodology « SSM » dont le but d'affirmer que considérer l'avis des acteurs est une bonne initiative pour l'avancement de la recherche dans le secteur de la santé. Cependant, ils ne font pas référence à la pratique « stakeholders » proposée par [12]. [24] introduit l'APP à la systémique et à la dynamique de l'environnement. En revanche, l'approche est appliquée exclusivement au managent de l'entreprise.

Sur un plan désagrégé et relatif au transport, la DS a été appliquée au le transport urbain. Certains modèles analysent le transport de personne [25]. D'autres analysent le transport urbain de marchandise TMU [26]–[28][29][30]. Quelque uns se focalisent, cependant, sur l'analyse des politiques stratégiques du transport [31]. La AS est appliquée, quant à elle, à la notion de la ville [32] associée au TM en ville [33]. L'APP a été proposée par [34] pour l' analyse la chaîne de transport maritime afin de développer des stratégies d'engagement pour le transport de conteneur vide. A l'issu de cette analyse, l'application de ces approches s'est focalisée soit dans le domaine de l'entreprise, soit dans le domaine de transport urbain ou encore au port à conteneur. Aucune n'a analysé l'efficience d'un port pétrolier.

Ainsi, l'approche proposée cherche à comprendre le fonctionnement de la gestion de port pétrolier et de détecter les critères les plus influents. Elle débute par décomposer le système en sous-systèmes. L'acteur est le critère de découpage systémique dont découle des décisions. Il dispose de systèmes d'opérations et de contraintes. Ces contraintes sont liées à son environnement actif composé de phénomènes stochastiques dont notamment les conditions météorologiques. Elles sont aussi liées à son environnement passif représenté par toute entité (acteur) susceptible d'intervenir dans son processus interne, dont notamment l'institution de gestion et d'exploitation du transport terrestre et de l'infrastructure. Les relations des composants du système acteurs sont par la suite identifiées et quantifiées par le moyen de la DS. A l'issu de cette analyse, un cadre conceptuel pour la gestion la chaîne logistique portuaire est établi. Ce cadre conceptuel est composé de deux parties et cinq étapes (numérotées de I à V dans la suite).

La première partie représente un cadre théorique pour l'analyse de la chaîne logistique portuaire (étapes I, II, III) alors que la deuxième partie représente un cadre conceptuel pour la modélisation de la dynamique de la chaîne (étapes IV et V).

L'étape I « Identification des acteurs » permet de cerner l'ensemble des parties de la chaîne maritime de transport de pétrole. Les étapes II et III « Décomposition de la chaîne en systèmes » et Analyse des différents systèmes » permettent d'étudier les éléments du système. L'étape IV « Analyse de la dynamique » permet d'examiner les comportements et de comprendre les interactions. L'étape V « Modélisation et simulation » permet de concrétiser des scenarii et d'en tirer des décisions.

Des étapes I à III découle un Système Central « Chaîne Logistique Portuaire de Pétrole », un Système Environnement Actif « SEA » et un Système Environnement Passif « SEP » dont les interactions sont représentées à la Figure 1.

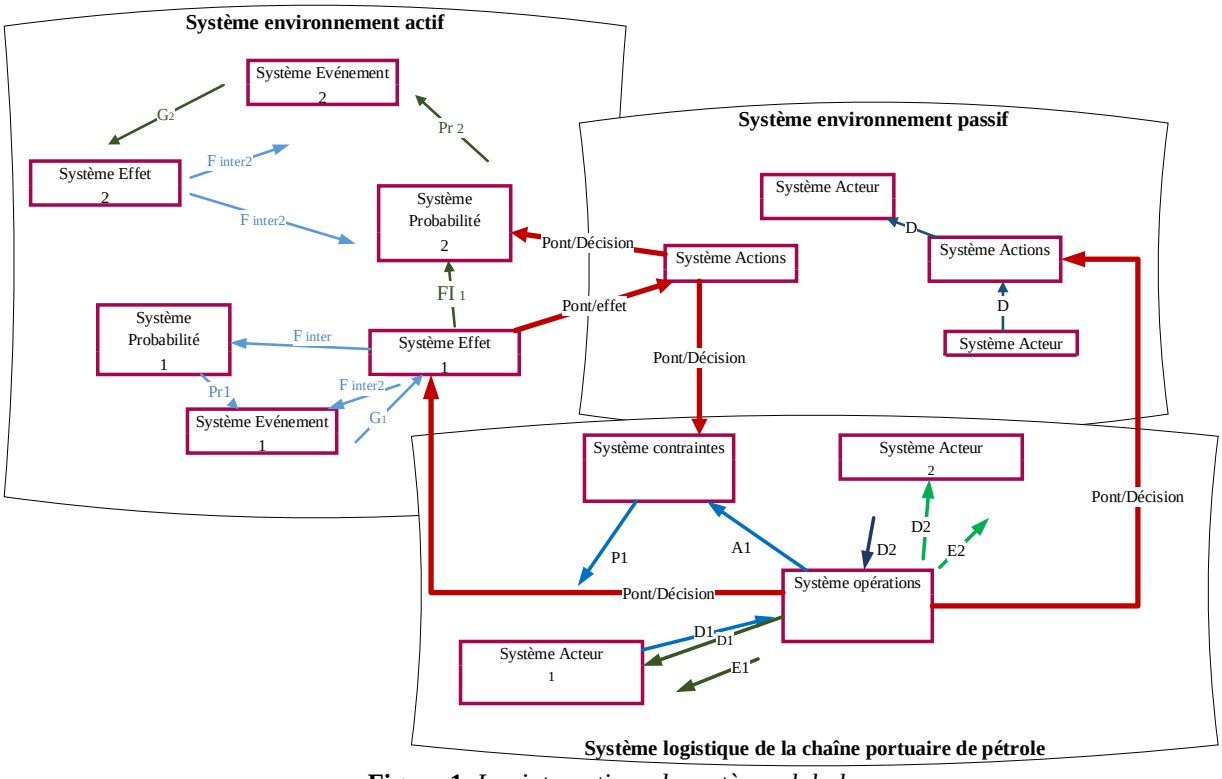


Figure 1. *Les interactions du système global*

La deuxième partie du cadre conceptuel représente sa mise en application. Elle étudie la dynamique de la chaîne logistique portuaire (étapes IV et V). Elle est constituée aussi de cinq étapes. La première consiste à placer les acteurs par rapport aux trois systèmes détectés lors du cadre conceptuel. La deuxième a pour but de déterminer pour chaque système général quelles sont « ses opérations, ses contraintes, ses actions, ses probabilités d'un événement et ses effets. La troisième consiste à établir les relations qui existent entre les systèmes et les sous-systèmes. La quatrième étape permet de définir les variables de décision de chaque acteur par rapport la problématique de la compétitivité portuaire. Enfin, la cinquième étape vise à repérer les variables de décisions les plus fiables pour atteindre notre objectif. De cette deuxième partie découle une représentation simplifiée des relations d'acteurs (Figure 2).

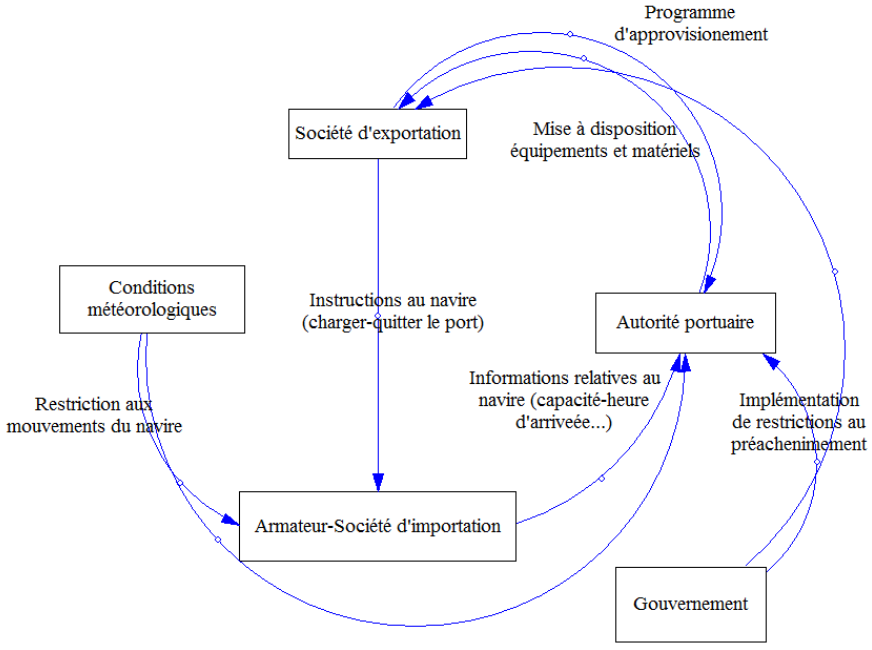


Figure 2. *Représentation simplifiée des relations Acteurs*

A partir de la Figure 2, nous établissons un modèle dynamique pour analyser l'efficience portuaire. Dans ce cas d'application, l'efficience est traduite par le temps total passé au port (TTPP). En effet, les utilisateurs du port, en l'occurrence les capitaines des pétroliers sont sensibles au temps de séjour du navire au port. Ce temps est répercuté par la qualité du service et de prestation portuaire. Cette sensibilité est reliée principalement au respect du planning de voyage et à la perte monétaire relative.

Le « temps » est un indicateur de performance opérationnel classé comme pertinent et intègre la liste des « Indicateurs de performance clés IPC » [35]. [36] le définie comme le temps écoulé entre l'arrivée et le départ du navire « turnaround time ». [37] l'associe au temps d'attente, au taux d'occupation du quai, et au temps de travail au quai. Il le classe comme indicateur physique.

Dans le but de mieux recenser les variables de décision, nous décomposons le TTPP en trois phases à savoir : le temps d'attente avant chargement, le temps de chargement et le temps d'attente après chargement. Les équations sont décrites dans le paragraphe suivant et exprimées selon les unités de base du système international.

3. Données et formules

L'analyse de l'efficience portuaire est déduite des observations effectuées sur un échantillon de 61 navires pétroliers qui ont séjourné au port de la Skhira entre 2011 et 2012[1]. Comme le montre la Figure 3, le temps passé avant le chargement (phase 1- bleu) et le temps de chargement (phase 2- rouge) sont assez importants comparés au temps d'attente après chargement (phase 3-vert).

[1] Données propres à l'Entreprise Tunisienne des Activités pétrolières

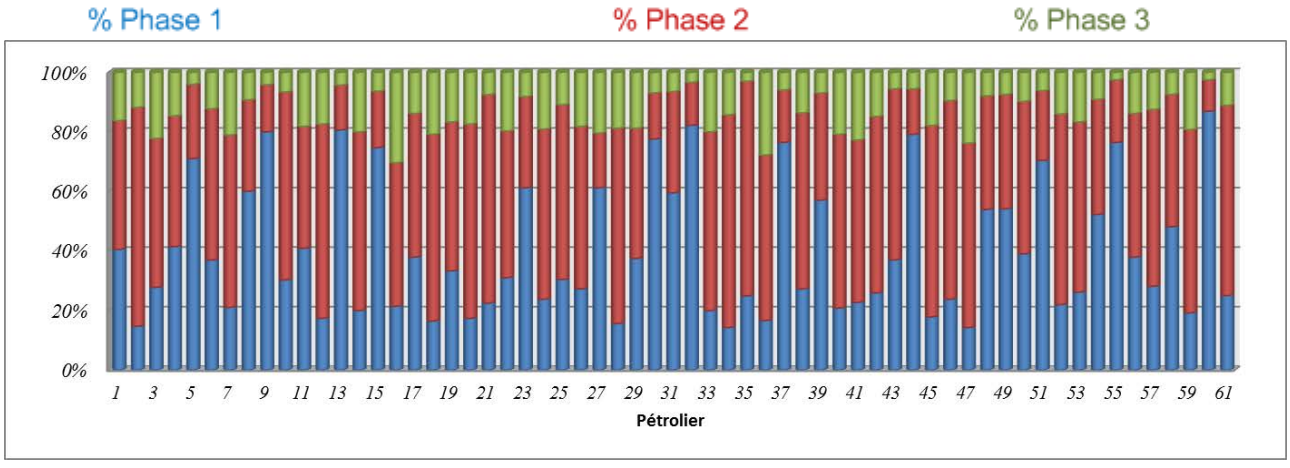


Figure 3. *Durée de séjour d'un pétrolier selon les 3 phases*

Le calcul du temps relatif à chaque phase est établi selon les formules ([1], [2] et [4]).

- Formule du temps de chargement

$$Tch_i = \frac{Qu_i}{Qv_j} = \frac{Qu_i}{n_j * v_j * \pi * \frac{d_j^2}{4}} \qquad [1]$$

Avec : Qu_i : la quantité chargée au navire i (m^3)
Qv_j : le débit volumique du pipeline j (m^3/s)
v_j est la vitesse du fluide dans le connecteur (flexible) (m/s)
n_j est le nombre de flexibles connectés (utilisés pour le chargement)
d_j est le diamètre des flexibles utilisés pour le chargement du navire (en m)

- Formule du temps d'attente avant chargement

$$Tavch_i = \left|Tfmt - \max(Tar_i; Teta_i)\right| \qquad [2]$$

Avec : $Tavch_i$: Temps d'attente avant chargement du navire i
Tar_i : temps d'arrivée en rade du navire
$Teta_i$: temps d'acceptation d'ETA correspondant au navire i
Tfmt : Temps de fin du mauvais temps

Ce dernier est exprimé selon le retard engendré par un mauvais temps. Sa formule est :

$$R_i = a * Eff_m \text{ avec } Eff_m = b * prob_m \ (a \leq 1 \text{ et} \neq 0) \qquad [3]$$

R_i =Retards engendré par le mauvais temps

Eff_m = Effet engendré par le mauvais temps

$prob_m$ = Probabilité d'avoir du mauvais temps

a et b ≥ 0 Donc $R_i = a * b * prob_m$

Équation 1:Formule du retard causé par le mauvais temps

- Formule du temps d'attente après chargement

$$Taprèsch = T_{\max int rodoc} + retard_{induit} \quad [4]$$

Avec : $T_{\max int rodoc}$: Temps maximum pour traiter les documents

$Retard_{induit}$: Retards induit (pour une raison ou une autre)

5. Résultats et discussion

A partir des équations précédemment expliquées et grâce à l'établissement des relations de « cause à effet », le modèle dynamique qui permet de calculer le temps passé au port est illustré à la Figure 4 :

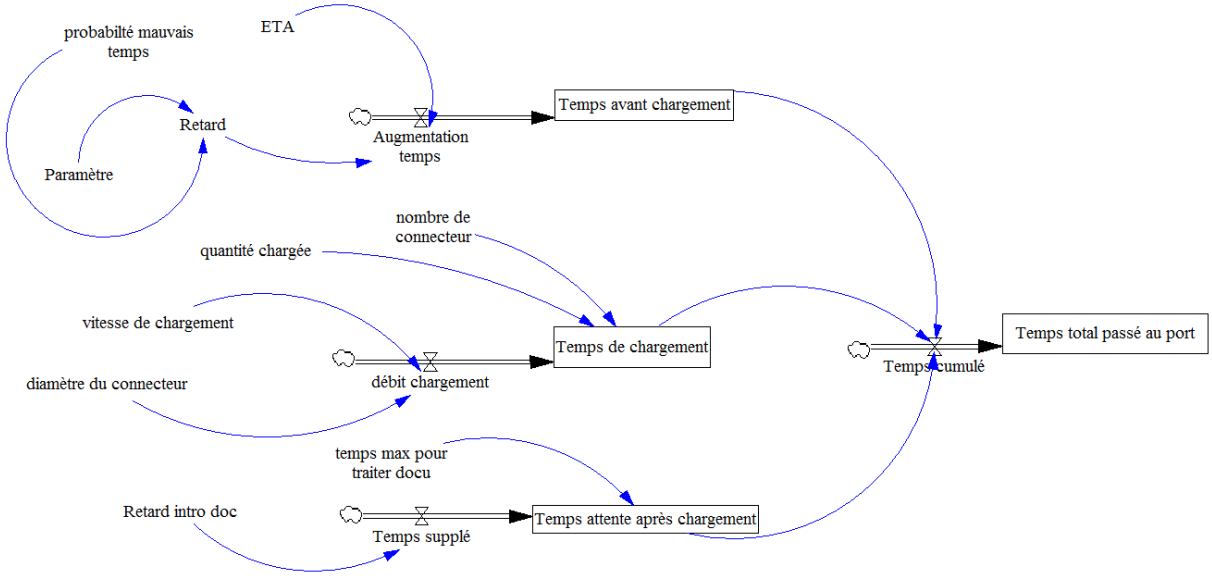


Figure 4. *Modèle dynamique simplifié pour le calcul du temps global passé au port*

Nous effectuons à présent plusieurs analyses de sensibilité. Ces analyses étudient les perturbations engendrées par les variables d'entrée sur les variables de sortie [38] ce qui permet d'identifier les paramètres les plus pertinents à l'efficience portuaire. A chaque analyse, nous maintenons les valeurs du scénario de référence et nous changeons seulement la valeur du paramètre dont nous souhaitons analyser l'influence. Les paramètres considérés dans ces analyses sont « probabilité d'un mauvais temps », « quantité chargée », «vitesse de chargement, et « diamètre du connecteur ».

Leurs valeurs respectives pour le scénario de référence sont $prob_m$ = 63%, Qu_i = 9800m^3, v_j = 40m/s et d_j = 0.3048m. Nous supposons que nous utilisons un seul connecteur pour charger le pétrolier, que l'effet de retards est de 0.3 et que le temps d'attente totale après chargement étant de $Taprèsch$ = 2heures.

Le scénario de référence est représenté par les courbes bleues dans les figures 5, 6, 7, 8, 9, 10 et 11. Les courbes rouges représentent le comportement du TTPP après modification des paramètres.

L'axe vertical de l'ensemble des figures représente le temps en Billion (B) and Million (M) de secondes « s » alors que l'axe des ordonnées reprend les « pas de simulation » par minute.

L'augmentation de la vitesse a pour première conséquence la diminution sur le temps de chargement.

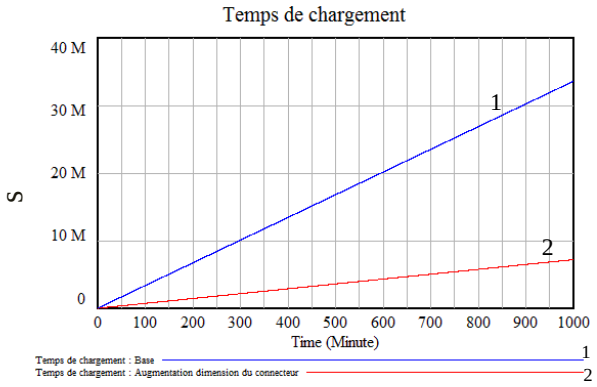


Figure 5. *Effet de l'augmentation de la vitesse sur le temps de chargement*

Toute chose étant égale par ailleurs, le changement de la vitesse de chargement influence de façon directe le temps total passé au port.

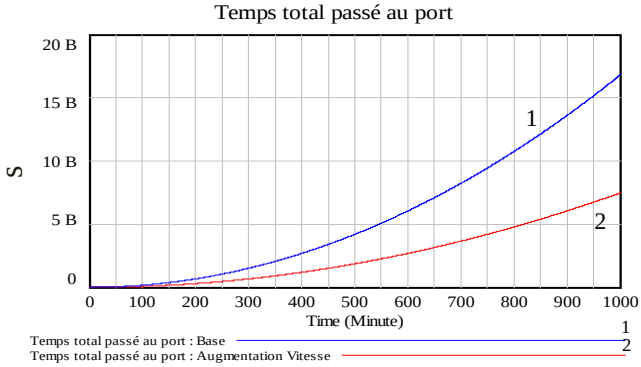


Figure 6. *Effet de l'augmentation de la vitesse sur le temps total passé au port*

Pour la troisième analyse, nous avons diminué la valeur de la probabilité d'un mauvais temps afin d'observer son effet sur le temps total de séjour au port. Nous remarquons une influence importante comme le montre la Figure 7. Cela signifie que les conditions météorologiques participent de façon significative au déroulement du séjour du navire. Grace à cet exemple, nous montrons que le « système environnement actif » agit indirectement sur la gestion portuaire.

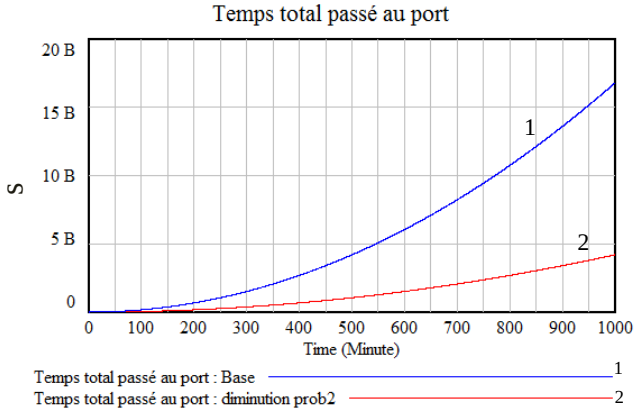


Figure 7. *Effet de la diminution de probabilité mauvais temps*

L'augmentation de la quantité à charger influence évidemment le temps de chargement (Figure 8). Cependant, nous ne nous pouvons pas la mettre en cause car elle est une condition imposée entre le vendeur et l'acheteur.

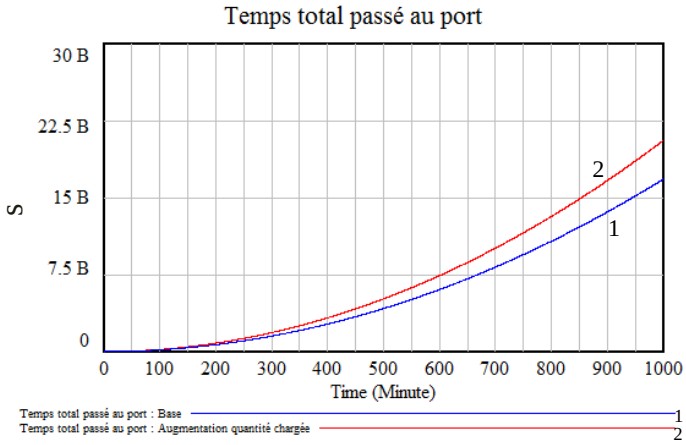


Figure 8.*Effet de l'augmentation de la quantité chargée sur le TTPP*

Pour faire face à une demande importante de transport de brut, il est judicieux de modifier d'autres paramètres tels que par exemple le nombre de connecteurs et leur diamètre. Cela aboutira à diminuer par conséquent le temps de séjour au port. En plus, agir sur différents paramètres en même temps apporte plus de résultats qu'en modifier un seul (voir : Figure 9, Figure 10 et Figure 11).

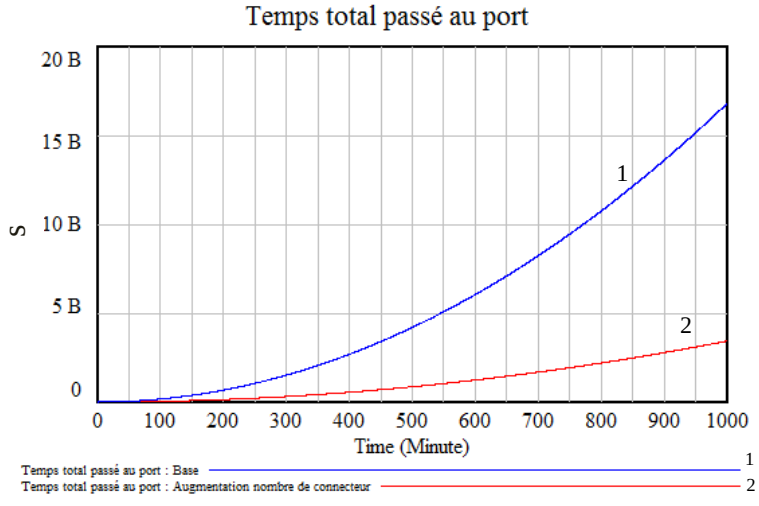


Figure 9. *Effet de l'augmentation du nombre de connecteur sur le TTPP*

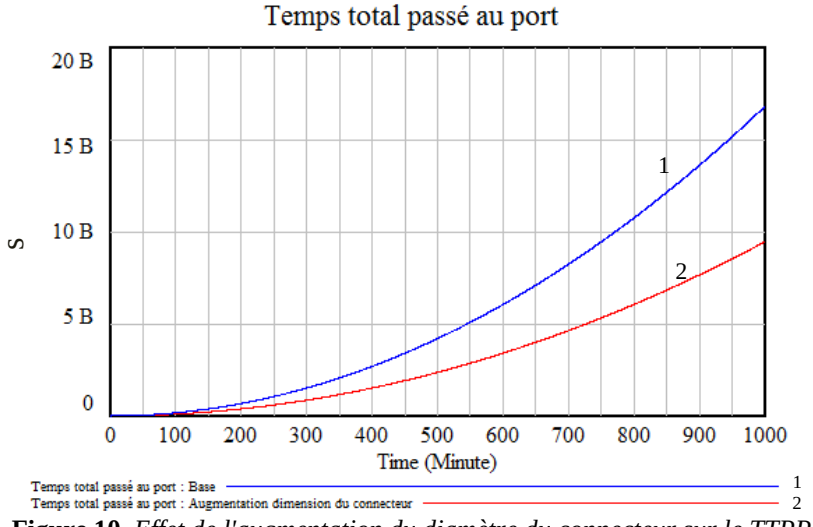


Figure 10. *Effet de l'augmentation du diamètre du connecteur sur le TTPP*

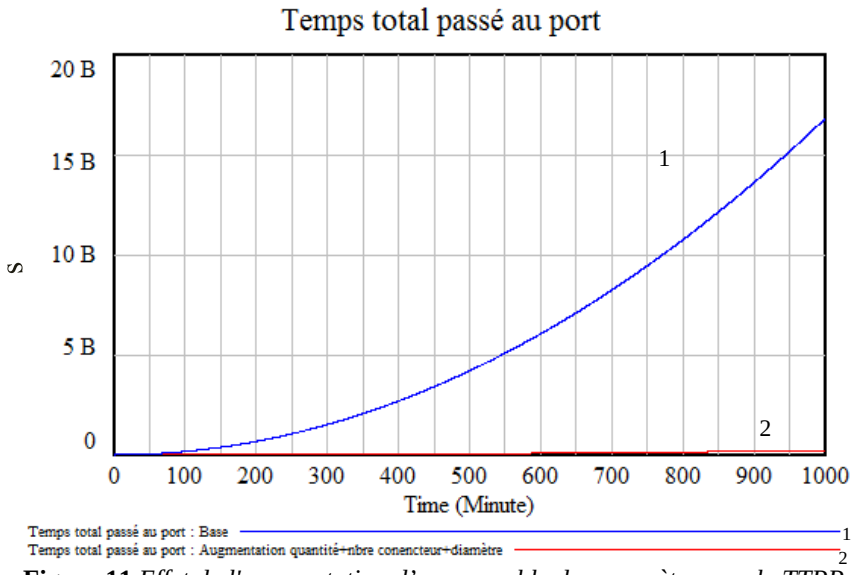


Figure 11.*Effet de l'augmentation d'un ensemble de paramètres sur le TTPP*

Ainsi ces analyses de sensibilité montrent que les paramètres les plus pertinents sont la vitesse de chargement elle-même fonction de la dimension des connecteurs (flexibles) et le nombre de connecteurs utilisé lors du chargement. Ces éléments représentent ce qu'on appelle la performance technique. L'autorité portuaire devrait, de ce fait, investir dans la rénovation des équipements du port et plus spécifiquement dans les flexibles en augmentant leur nombre et leurs dimensions.

6. Conclusion et perspectives

Le cadre conceptuel de la gestion portuaire sert d'outil d'aide à la décision grâce à l'établissement des relations qui caractérisent l'environnement portuaire. Il est aussi un outil pour l'analyse de l'efficience du port grâce à sa phase de modélisation et simulation. Les analyses de sensibilité effectuées par le logiciel Vensim® (version 6.3G), ont montré que le temps passé au port est fortement tributaire de la vitesse de chargement et du nombre de flexibles connectés. Ce temps passé au port reflète l'efficience technique qui est un des critères de l'appréciation des usagers. Plus sa valeur est faible moins il sera apprécié, et par conséquent moins il sera performant.

D'autres paramètres semblent aussi influencer la performance technique du port tel que par exemple le nombre de quais. Afin d'enrichir notre modèle de simulation, il semble dès lors important de le calibrer afin de l'ajuster au mieux à la réalité. En outre, dans le cadre de futures recherches, nous procéderons à des analyses de coût afin d'enrichir le cadre conceptuel au niveau financier. Il est aussi question d'améliorer le modèle par l'introduction de nouveaux paramètres. Cela va, cependant rendre l'établissement du modèle plus complexe si bien que des connaissances spécifiques à la modélisation dynamique approfondie et à la maîtrise de l'ensemble du domaine portuaire seraient nécessaires.

Remerciement
La recherche a été subsidiée par le Fonds Spécial pour la Recherche (FDR) financé par la Fédération Wallonie-Bruxelles.

Bibliographie

[1] H. Meersman, E. Van De Voorde, and T. Vanelslander, "Port Competition Revisited," *Rev. Bus. Econ.*, vol. 55, no. 2, pp. 210–232, 2010.
[2] T. Notteboom, "Spatial and functional integration of container port systems and hinterland networks in Europe," Paris, 1998.
[3] H. Meersman, E. Van De Voorde, and T. Vanelslander, "Competition and regulation in seaports," in *A handbook of transport economics*, A. De Palma, R. Lindsey, E. Quinet, and R. Vickerman, Eds. Elgar Original Reference, 2011,

pp. 822–843.
[4] T. Notteboom and W. Y. Yap, “Port Competition and Competitiveness,” in *The Blackwell Companion to Maritime Economics*, W. K. Talley, Ed. Blackwell Publishing Ltd., 2012, pp. 549–570.
[5] P. Cariou and G. Figueiredo De Oliveira, “Les déterminants de l’efficience portuaire : une analyse des ports à conteneurs méditeranéens,” in *Dynamique portuaire et développement régional*, L’Harmatta., vol. 41, 2015, pp. 83–99.
[6] F. Coppens, F. Lagneaux, H. Meersman, N. Sellekaerts, E. Van De Voorde, G. Van Gastel, and T. Vanelslander, “Economic Impact of Port Activity: a disaggregate analysis - The Case of Antwerp,” Antwerp, 110, 2007.
[7] National Bank of Belgium, “Importance économique des ports belges : Ports maritimes flamands, complexe portuaire liégeois et port de Bruxelles,” 172, 2009.
[8] E. Van der Voorde and W. Winkelmans, “A general introduction to port competition and management,” in *Port Competitiveness: An Economic and Legal Analysis of the Factors Determining the Competitiveness of Seaports*, De Boeck., M. Huybrechts, H. Meersman, E. Van de Voorde, E. Van Hooydonk, A. Verbeke, and W. Winkelmans, Eds. Antwerp, 2002, pp. 1–16.
[9] C.-H. Frédouet and P. Le mestre, “La construction d’un outil de mesure de la performance des réseaux interorganisationnels : une étude des réseaux d'acteurs portuaires,” *Financ. Contrôle Strat.*, vol. 8, no. 4, pp. 5–32, 2005.
[10] T. Notteboom and J.-P. Rodrigue, “The corporate geography of global terminal operators,” *Marit. policy Manag.*, vol. 39, no. 3, pp. 249–289, 2012.
[11] L. von Bertalanffy, *Théorie générale des systèmes*. Paris: Dunod, 1993.
[12] E. R. Freeman, *Strategic Management: A stakeholder Approach*. Boston: Pitman, 1984.
[13] J. W. Forrester, *Principes des systèmes*. Science des systèmes, 1980.
[14] J. W. Forrester, *Principles of Systems*, 2nd ed. Pegasus Communications, 1968.
[15] R. Bagaoui, “Compte rendu de l’ouvrage : La systémique, penser et agir dans la complexité,de Gérard Donnadieu et Michel Karsky (2002), Éditions Liaisons, Paris.,” *Nouv. Perspect. en Sci. Soc. Rev. Int. systémique complexe d’études relationnelles*, vol. 1, no. 2, pp. 219–224, 2006.
[16] G. Donnadieu and M. Karsky, *La Systémique, Penser et agir dans la Complexité*. Liaisons, 2002.
[17] E. R. Freeman, J. S. Harrison, A. C. Wicks, B. Parmer, and S. De Colle, *Stakeholder Theory,The State of the Art*. New York: Cambridge University Press, 2010.
[18] D. B. Bériot, “L’approche systémique du changement dans l’entreprise, Présentation et démarche,” *La Lett. d’ADELI*, vol. 65, pp. 7–10, 2006.
[19] J. De Rosnay, *Le macroscope*. Paris: Seuil, 1975.
[20] D. Durand, *La systémique*. 1979.
[21] G. Donnadieu, D. Durand, D. Neel, E. Nunez, and L. Saint-Paul, “L’Approche systémique: de quoi s'agit-il?,” Paris, 2003.
[22] E. R. Freeman, A. C. Wicks, and B. Parmar, “Stakeholder Theory and ‘The Corporate Objective Revisited,’” *Organ. Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 364–369, 2004.
[23] A. Fromont, N. Ribesse, J. Martini, and B. Dujardin, “Les acteurs et l’approche systémique: l'appui de la recherche,” *Ecos du COTA*, no. 133, Belgique, pp. 19–24, Dec-2011.
[24] R. Baldegger, *Management in a Dynamic Environment:Concepts, Methods and Tools*. Springer Gabler, 2012.
[25] C. Raux, M. Sdika, and V. Hermanier, “Simulation de la dynamique du système de déplacements urbains : une plate-forme de modélisation,” 2003.
[26] P. Salini and M. Karsky, “Prospective des transports de marchandises en France à l’horizon 2020 le modèle Simtrans,” Paris, 1999.
[27] P. Salini, “La dynamique des systèmes : Retour sur une expérience d’application aux transports de marchandises,” Prédit, 1999.
[28] P. Salini and M. Karsky, “SIMTRANS freight transportation simulation model,” in *International Conference of the System Dynamics Society*, 2002.
[29] F. Toillier, L. Alligier, D. Patier, and J.-L. Routhier, “Vers un modèle global de la simulation de la logistique urbaine : FRETURB, version 2,” 2005.
[30] V. Gacogne, “Impact des coûts de transport sur les systèmes logistiques par une modélisation en dynamique des systèmes : Le modèle SANDOMA,” Ecole Nationale des Ponts et Chaussées Ecole, 2003.
[31] W. Rothengatter, W. Schade, A. Martino, M. Roda, A. Davies, L. Devereux, and I. Williams, “ASTRA Methodology,” 2000.
[32] A. Cambien, “Une introduction à l’approche systémique : Appréhender la complexité,” 2007.
[33] J.-L. Routhier and J. Gonzalez-Feliu, “Transport de marchandises et formes urbaines,” in *Ville et mobilité*, G. Brun, Ed. Economica, 2013, pp. 57–81.
[34] J. Wolff and H. Flämig, “Managing stakeholders along the maritime transport chain, An introduction,” 2009.
[35] N. Sarwar, “Time-related key performance indicators and port performancec : A review of theory and practice,” Vestfold University College, 2013.
[36] UNCTD, “Port performance indicators,” in *United nations conference on trade and development*, 1976, p. 131.
[37] K. Bichou and R. Gray, “A logistics and supply chain management approach to port performance measurement,” *Marit. Policy Manag.*, vol. 31, no. 1, pp. 47–67, 2004.
[38] J. Jacques, “Pratique de l’analyse de sensibilité : Comment évaluer l'impact des entrées aléatoires sur la sortie d'un modèle mathématique,” Université de Lile, 2011.

Contribution à la Modélisation du GSOM Lagrangien

Asma Khelifi [1, 2, 4,a)], Habib Haj-Salem [2], Jean-Patrick Lebacque [2], Jennie Lioris [2], Guillaume Costeseque [3], Lotfi Nabli [4]

[1] *Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, ENIT.*
[2] *Université Paris-Est, IFSTTAR, GRETTIA France.*
[3] *Inria Sophia Antipolis, France.*
[4] *Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, ENIM, LARATSI.*
[a)] *asma.khelifi@ifsttar.fr, asma.khelifi@enit.rnu.tn*

RÉSUMÉ. *Dans nos travaux, nous sommes motivés par la modélisation du réseau routier grâce aux modèles macroscopiques de flux de trafic d'ordre supérieur. Plus précisément, la famille générique des modèles GSOM. Nous étudions alors le modèle d'intersection basé sur la discrétisation lagrangienne du modèle GSOM. En effet, les modèles macroscopiques d'ordre supérieur ont été étudié sur une section homogène, mais ils attirent encore peu d'attention pour leur mise en œuvre sur des jonctions parce qu'elles sont très difficiles à traiter. Cependant, les jonctions sont la principale source de difficulté pour les flux de trafic sur un réseau. Notre objectif est de développer un modèle d'intersection compatible avec la description microscopique et macroscopique, et de satisfaire les contraintes classiques (le principe d'invariance par exemple).*

ABSTRACT. In this paper, we are motivated by road network traffic flow modeling, thanks to higher order macroscopic traffic flow models. More precisely, we focus on the Generic Second Order Models (GSOM) family which embeds a large variety of traffic models. Lagrangian GSOM models have been already well studied on homogeneous section but they attracted little attention for their implementation on intersections. However, junctions are the main source of difficulty for traffic streams on a network. In this paper, we develop a numerical scheme of a junction model which is compatible with micro and macro description, and satisfy the constraints of the invariance principle.

MOTS-CLÉS : *modélisation du trafic routier, famille GSOM, GSOM Lagrangien, schéma numérique, modèle de jonction.*

KEY WORDS: *traffic flow modeling, GSOM family, Lagrangian GSOM, numerical scheme, junction model*

1. Introduction

Depuis la seconde moitié du 20ème siècle, le phénomène de la congestion autoroutière est devenu prééminent en raison de la crise énergétique mondiale (augmentation des prix pétroliers) et de la catastrophe économique mondiale. Parmi les différents leviers, la modélisation du trafic est au centre des développements actuels pour améliorer la circulation routière dans les villes modernes avec des tendances d'urbanisation. Les modèles de simulation du trafic sont des outils précieux et utiles pour plusieurs tâches d'ingénierie du trafic. Parmi les modèles macroscopiques, nous trouvons une nouvelle famille de modèles macroscopiques de second ordre (GSOM « Generic Second Order Model »). Les modèles GSOM ont pour principal avantage de modéliser l'apparition et l'évolution de phénomènes transitoires qui apparaissent dans la réalité lorsque le trafic subit des variations de son état. Mais, ils sont complexes et difficiles à utiliser : les solutions analytiques ne peuvent pas être calculées facilement même dans des cas très simples. Cette famille de modèles GSOM fera l'objet de ce papier. L'objectif primordial recherché est la résolution numérique en discrétisation Lagrangienne et la modélisation des trajectoires de paquets de véhicules ; ainsi que la modélisation d'intersection en coordonnées lagrangiennes. Dans le domaine de la simulation du trafic, la modélisation de l'intersection est un problème complexe et très mal résolu jusqu'à présent. Comme l'intersection est un lieu de croisement des trajectoires de différents véhicules, elle est aussi potentiellement génératrice de nombreux conflits et d'accidents. Le but d'un modèle de nœud est de relier les conditions aux limites en amont et en aval d'une section de convergent/divergent. L'analyse des conditions aux limites et de la modélisation de l'intersection sont au premier plan au niveau de ce travail. Cependant, pas toutes les combinaisons d'offre/demande et les modèles d'intersection produisent des modèles de nœuds consistants et cohérents. Un critère de sélection est dérivé: c'est le principe d'invariance. La modélisation des intersections nécessite la prise en compte du principe d'invariance afin d'assurer la stabilité du schéma numérique. Les modèles du nœud formulés en termes de liaison, nœuds, offre et demande qui satisfont le principe d'invariance peuvent être formulés pour le modèle GSOM. Parmi ces modèles il y a les modèles du nœud et l'état interne de [KHO 09], [KHO 08] et [LEB 13]. Ces modèles d'intersection sont compatibles avec la discrétisation

lagrangienne. Le principal problème résolu dans le papier de [KHO 08] est la modélisation des intersections en combinant l'approche offre/demande pour les liaisons et les nœuds, le modèle interne pour les nœuds et les conditions aux limites de nœuds.

Tout d'abord, nous menons un travail préparatoire à la construction de modèle GSOM Lagrangien en formulant le problème posé ; puis sa résolution par la méthode de résolution numérique basée sur le schéma de Godunov; à travers une transformation de coordonnées Eulériennes en coordonnées Lagrangiennes. Ensuite, nous introduisons la méthodologie adoptée pour la nouvelle résolution numérique pour la modélisation d'intersection en coordonnées lagrangiennes, ainsi que quelques résultats de simulation obtenus.

2. Spécification du modèle GSOM

Une extension naturelle du modèle LWR ([LIG 55] ; [RIC 56]) est constituée par la famille GSOM des modèles mis en place par [LEB 07]. La famille GSOM inclut le modèle LWR et englobe de nombreux autres modèles macroscopiques ([AW 00]; [ZHA 02]; [COL 02]; [ZHA 09]; [LEB 07] ; [KHO 09] ; [TRE 15]). La dynamique de flux de circulation résulte de l'interaction de deux processus. Le premier est hydrodynamique de nature, et les rendements de caractéristiques comportementales de trafic qui peuvent être observés sur une base régulière, à savoir les ondes d'accélération (raréfaction) et de décélération (ondes de choc), la congestion, la diminution de la vitesse avec la densité, etc. Le deuxième processus résulte de l'impact des attributs spécifiques du conducteur (comportement, origine-destination, classe véhicule/conducteur) sur la fluidité du trafic. Ces deux processus sont intégrés dans une seule famille de modèles de flux de trafic macroscopique, à savoir la famille GSOM.

Le modèle GSOM est exprimé comme suit:

$$\begin{cases} \dfrac{d\rho}{dt} + \dfrac{d\rho v}{dx} = 0 \\ \dfrac{\partial \rho I}{\partial t} + \dfrac{\partial \rho I v}{\partial x} = -\rho f(I) \\ v = \Im(\rho, I) \end{cases} \qquad [1]$$

Le comportement de flux de trafic selon l'équation [1] admet deux types d'ondes :

- les ondes cinématiques (ou 1-onde) qui affectent la densité et sont semblables aux ondes du modèle LWR. Le vecteur attribut du conducteur I est continue à travers une 1-onde.
- Les discontinuités de contact (ou 2-ondes) qui propagent des variations ou des discontinuités de I à la vitesse $v = \Im(\rho, I)$.

3. Résolution numérique du modèle GSOM

La résolution numérique du modèle GSOM que nous proposons se fait par discrétisation spatio-temporelle fondée sur le schéma de Godunov. L'idée de base du schéma numérique de Godunov est de relier les notions du schéma numérique et celles de la solution du problème de Riemann.

Un exemple du modèle GSOM est donné par le modèle ARZ ([AW 00]; [ZHA 02]), dans lequel la fonction $\Im$ est définie par :

$$\Im(\rho, I) = V_e(\rho) + I \qquad [2]$$

Avec $V_e(\rho)$ est le diagramme fondamental vitesse-densité.

Ce modèle exige des ajustements pour que la densité puisse rester dans les limites physiques. L'idée de base de la discrétisation lagrangienne du modèle GSOM est la suivante: premièrement nous réécrivons le modèle GSOM dans sa forme lagrangienne, deuxièmement nous intégrons les équations pour les attributs comportementaux et nous intégrons le résultat dans l'équation d'onde cinématique. Le résultat de cette procédure sera une seule loi de conservation pour l'inter-distance des véhicules.

Le modèle GSOM est équivalent au système de coordonnées lagrangiennes suivant :

$$\begin{cases} \partial_T r + \partial_N v = 0 \ \text{ Conservation des véhicules} \\ \partial_T I = 0 \ \text{ Conservation de l'attribut du conducteur I} \\ v = \vartheta(r, I) \underline{\underline{def}} \Im(1/r, I) \ \text{ Conducteur dépendant du diagramme fondamental} \end{cases} \quad [3]$$

Le principe de la discrétisation lagrangienne est de considérer la fonction cumulée, que nous notons $N(x,t)$ et d'exprimer le modèle comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x} = \Im(\rho, I) \\ \dot{I} = -S(I) \end{cases} \quad [4]$$

En considérant $x_n(t)$ la trajectoire du nième véhicule, c'est-à-dire $N(x,t) = n$, le système [3] discrétisé est donné alors par :

$$\begin{cases} \dot{x}_n(t) = \Im\left(\dfrac{1}{x_{n-1}(t) - x_n(t)}, I_n(t) \right) \\ \dot{I}_n(t) = -S(I_n(t)) \end{cases} \quad [5]$$

Le modèle [3] discrétisé dans le temps s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{cases} x_n(t + \Delta t) = x_n(t) + \Delta t \Im\left(\dfrac{1}{x_{n-1}(t) - x_n(t)}, I_n(t) \right) \ \text{ avec } \ \Delta t = dt \\ I_n(t + \Delta t) = \Psi(I_n(t), \Delta t) \end{cases} \quad [6]$$

Avec $\Psi(I_0, \tau)$ est la solution à l'instant τ de $dt/d\tau = -S(I)$ et $I_{\tau=0} = I_0$.

Nous avons :

$$\dot{x}_n(t) = \Im\left(\frac{1}{x_{n-1}(t) - x_n(t)}, I_n(t) \right) \quad [7]$$

Par conséquent, pour le cas de traitement par paquet de véhicules (ΔN est le nombre de véhicule par paquet de véhicules), nous obtenons le modèle GSOM discrétisé suivant :

$$\begin{cases} x_n(t + \Delta t) = x_n(t) + \Delta t . v_n(t) \\ v_n(t) = \Im\left(\dfrac{x_{n-1}(t) - x_n(t)}{\Delta N}, I_n(t) \right) \\ I_n(t + \Delta t) = I_n(t) + \Delta t . S(I_n(t)) \end{cases} \quad [8]$$

4. Modélisation de l'intersection au niveau Lagrangien

On présente dans cette section le nouveau schéma numérique amélioré qu'on a adopté pour le modèle GSOM Lagrangien sur jonction, en se référant aux travaux de [LEB 13] et [COS 15], tout en ajoutant un modèle de jonction à état interne analysant la dynamique des véhicules à l'intérieur du nœud. Un exemple numérique de simulation est donné.

4.1. Conditions aux limites en aval

On considère le point de sortie S situé à la position x_S. Les données sur les conditions aux limites en aval à x_S sont données par l'offre discrétisée en aval σ^t. On note que : $(n+1)$ est la dernière particule située sur le lien, et η est la proportion de la particule $(n+1)$ encore sur le lien à t.

L'interdistance associée à la particule $(n+1)$ est donnée par la formule suivante :

$$r_{n+1}^{t} = \frac{x_S - \chi_{n+1}^{t}}{\eta \Delta N} \quad [9]$$

La fraction η est instanciée lors du premier pas de temps t_n après la sortie de la particule (n) comme suit :

$$\eta = \frac{x_S - \chi_n^{t_n}}{r_n^{t_n} \Delta N} \quad [20]$$

Avec t_n est le temps d'entrée de l'arrière de la particule.

L'algorithme qu'on propose est composé comme suit :

1) Initialiser η
2) Calculer r_{n+1}^{t}
3) Il est nécessaire de distinguer 2 cas de figure :

a) Si $V\left(r_{n+1}^{t}, I_{n+1}^{t}\right) \le \sigma^{t} r_{n+1}^{t}$ et $\chi_{n+1}^{t+1} = \chi_{n+1}^{t} + \Delta t.V\left(r_{n+1}^{t}, I_{n+1}^{t}\right)$: dans ce cas, l'offre en aval est suffisante pour répondre à la demande sur le lien et l'interdistance est conservée.

b) Si $V\left(r_{n+1}^{t}, I_{n+1}^{t}\right) > \sigma^{t} r_{n+1}^{t}$: dans ce cas, la demande sur le lien ne peut pas être pleinement satisfaite puisque l'offre en aval limite le flux sortant. Ensuite, il faut résoudre $V\left(r_{n+1}^{t}, I_{n+1}^{t}\right) = \sigma^{t} r_{n+1}^{t}$ et choisir la plus petite valeur $r_{n+1}^{t} = r_*$ (phase congestionnée).

4) Puis, il faut mettre à jour l'indice et la position de la particule $(n+1)$. Il faut aussi mettre à jour la fraction η si la particule n'a pas totalement quitté le lien.

4.2. Conditions aux limites en amont

On considère le point de sortie E situé à la position x_E . Les données sur les conditions aux limites en amont à x_E sont données par la demande prescrite discrétisée en amont δ^t au pas de temps t . (n) est la dernière particule entrée dans le lien. Notre objectif est de s'adapter aux conditions aux limites en amont, la méthodologie mise au point pour les conditions aux limites en aval décrite dans la section précédente, par l'introduction d'une proportion de la particule η qui est déjà entré le lien. Le problème auquel nous sommes confrontés est que, contrairement aux conditions aux limites en aval où nous connaissons la position exacte de la dernière particule qui a quitté le lien, nous ne savons pas précisément la position de la particule suivante qui entrera le lien. Si nous considérons que la dernière particule qui a entièrement entré le lien au temps t , marqué n , nous introduisons une fraction η^t de la particule $(n+1)$ qui est déjà obtenu dans le lien à l'instant t . Nous notons que q^t est le débit effectif à l'entré en amont et à l'instant t pendant $\left(t\Delta t, (t+1)\Delta t\right)$.

L'algorithme que nous proposons est composé comme suit:

1) Initialisation de η : En supposant que la particule (n) entièrement entrée le lien au temps $t_n = (t+\varepsilon)\Delta t$, la proportion η^{t+1} à $(t+1)$ est donné par l'expression suivante :

$$\eta^{t+1} = \frac{q^t (1-\varepsilon)\Delta t}{\Delta N} \quad [31]$$

Avec $\varepsilon\Delta t = t\Delta t - t_n$ et $t_n = (t-\varepsilon)\Delta t$ est la date exacte à laquelle l'arrière de la particule (n) entre dans le lien à x_E .

2) Calculer le débit efficace entrant des particules qui pénètrent le lien q^t et la demande locale en aval σ^t par les expressions suivantes :

$$q^t = \min\left(\sigma^t, \delta_z^{\,t}\right) \quad [42]$$

$$\sigma^t = \sum\nolimits_{tronçon}\left(r_{n+1}^{t}, I_{n+1}^{t}\right) \quad [53]$$

Avec $\delta_z^{\,t}$: la demande cumulative de (z)

3) Calculer l'interdistance de la particule $(n+1)$ à t comme suit :

$$r_{n+1}^{t} = \frac{\chi_n^t - x_E}{\eta_{n+1}^{t} \Delta N} \quad [64]$$

Dans la jonction (z), il y aura alors $\left(1-\eta^t\right)\Delta N$ véhicules restant de la particule $\left(n+1\right)$.

4) Comparer $\left(1-\eta^t\right)\Delta N$ et $q^t\Delta t$, et distinguer 2 cas:

a) Si $q^t\Delta t<\left(1-\eta^t\right)\Delta N$, alors $\left(n+1\right)$ ne sort pas complètement du nœud et mettre à jour η_{n+1}^{t+1} :

$$\eta_{n+1}^{t+1}=\eta^t+\frac{q^t\Delta t}{\left(1-\eta^t\right)\Delta N} \quad [75]$$

b) Si $q^t\Delta t\geq\left(1-\eta^t\right)\Delta N$, alors $\left(n+1\right)$ sort complètement du nœud, avec l'instant de sortie est $\left(t+\varepsilon\right)\Delta t$ et mettre à jour ε_{n+1}^{t+1} :

$$\varepsilon_{n+1}^{t+1}=\frac{\left(1-\eta^t\right)\Delta N}{q^t\Delta t} \quad [86]$$

Il faut ensuite calculer la trajectoire de la particule $\left(n+1\right)$ pour le pas de temps suivant comme suit :

$$\chi_{n+1}^{t+1}=x_E+\varepsilon\Delta tV\left(r_{n+1}^t,I_{n+1}^t\right) \quad [97]$$

Le temps de parcours est $\varepsilon\Delta t$.

5) Initialisation de $\left(\eta^t,\varepsilon,q^t\right)$ et introduire la particule suivante en attente $\left(n+2\right)$ si elle a été déjà générée et ainsi de suite

Nous considérons un modèle à état interne utilisé comme un buffer entre les tronçons entrants et sortants de la jonction. Il suppose que la jonction (noté $\left(z\right)$) a une dimension physique et agit comme un buffer tel que les véhicules sont stockés avant de sortir sur les tronçons sortants. L'état interne a certains attributs spécifiques tels que : $N_z\left(t\right)$: Nombre total de véhicules dans le nœud, $N_{z,j}\left(t\right)$: Nombre de véhicules enregistrés dans le nœud et à destination de lien $\left(j\right)$, $I_z\left(t\right)$: Attribut du conducteur commun de véhicules stockés dans le nœud.

Le nombre de véhicules enregistrés dans le nœud est calculé grâce au système d'équations différentielles ordinaires suivant qui traduit la conservation de véhicules:

$$\begin{cases}\dfrac{dN_{z,j}\left(t\right)}{dt}=-R_j+\sum_i\gamma_{ij}Q_i\left(t\right) \quad \forall \text{j}\\ N_z\left(t\right)=\sum_j N_{z,j}\left(t\right)\\ \dfrac{d\left(N_z\left(t\right)I_z\left(t\right)\right)}{dt}=\sum_i Q_i\left(t\right)I_i\left(z^-,t\right)+\sum_j R_j\left(t\right)I_z\left(t\right)\end{cases} \quad [18]$$

En effet, au sujet de la limite supérieure de la capacité du nœud à notre avis nous avons besoin également d'introduire une limite supérieure sur $N_z\left(t\right)$ qui correspond au nombre maximal physique des véhicules qui peuvent être stockés dans le nœud. Nous introduisons les coefficients $\left(\beta_i\right)_j$ qui représentent la fraction de l'espace disponible pour les véhicules venant de $\left(i\right)$ par rapport à l'espace total disponible pour tous les tronçons entrants. Nous pouvons alors définir les fonctions partielles d'offre et de demande :

$$\begin{cases}\sum_i\left(t\right)=\beta_i\sum_z\left(N_z\left(t\right),I_z\left(t\right)\right) & \text{Modèle linéaire de répartition de l'offre}\\ \Delta_j\left(t\right)=\dfrac{N_{z,j}\left(t\right)}{N_z\left(t\right)}\Delta_z\left(N_z\left(t\right),I_z\left(t\right)\right) & \text{Modèle FIFO de répartition de la demande}\end{cases} \quad [19]$$

En effet, pour éviter toute perte d'information sur l'attribut du conducteur, il convient de noter que dans l'équation ci-dessous la composition du trafic $I_z\left(t\right)$ dans le nœud est supposée être conservée sur les tronçons sortants. Nous pouvons penser à une règle différente en dehors de la jonction, les conducteurs ne sont plus

"contraints" et ils peuvent naturellement reprendre leur attribut initial. Nous supposons que nous avons seulement l'information d'affectation de particules à savoir la matrice $\left(\beta_{i,j}\right)_{i,j}$, qui décrit la proportion de particules provenant du tronçon $i \in I$ qui veulent quitter la jonction sur le tronçon $j \in J$. Dans ce cas, on considère qu'une particule qui entre dans la jonction du tronçon i sortira sur le tronçon j avec une probabilité de $\beta_{i,j}$. Cette loi de probabilité pour décrire la dynamique interne de la jonction satisfait :

$$\sum_j \wp\left(i \to i\right) = \sum_j \beta_{i,j} = 1 \qquad [20]$$

En effet, nous considérons qu'une fois les particules ont pénétré la jonction, quelles que soient leurs origines, elles sont immédiatement affectées au buffer correspondant à leurs souhaits de tronçon sortant $j \in J$. Nous notons qu'il est aussi possible de considérer qu'à l'intérieur de la jonction, toute particule a un temps de déplacement non négligeable avant de rejoindre leur sortie, qui peut être affectée par le nombre total de particules à l'intérieur de la jonction.

5. **Résultats de simulation**

Le modèle qu'on a choisi pour représenter la vitesse $v_n\left(t\right)$ est le modèle 1-phase de Colombo proposé par (Colombo, 2002).

La fonction de la demande δ^t est définie comme suit :

$$\delta^t = \begin{cases} v_{\max}\rho \text{ si } \rho \le \rho_{crit} \\ q_{\max}\left(I\right) \text{ si } \rho \ge \rho_{crit} \end{cases} \qquad [21]$$

Alors que la fonction d'offre de flux de trafic σ^t est donnée par :

$$\sigma^t = \begin{cases} q_{\max}\left(I\right) \text{ si } \rho \le \rho_{crit} \\ \left(\mathrm{q}_* + \rho \mathrm{I}\right)\left(1 - \dfrac{\rho}{\rho_{\max}}\right) \text{ si } \rho \ge \rho_{crit} \end{cases} \qquad [22]$$

Avec:

$$q_{\max}\left(I\right) = \left(\mathrm{q}^* + \rho_{crit}\left(I\right)I\right)\left(1 - \frac{\rho_{crit}\left(I\right)}{\rho_{\max}}\right) \qquad [23]$$

Pour que les paquets de véhicules respectent la distance inter-véhiculaire minimale, il faut respecter la condition de stabilité CFL suivante :

$$\Delta t \le \frac{\Delta N}{\rho_{\max}\left(I_+\right) W_{\max}\left(I_+\right)} \qquad [24]$$

Avec $\rho_{\max}\left(I\right)$ est la densité maximale pour $\Im\left(\rho, I\right) \ge 0$ et $W_{\max}\left(I\right) = \partial_\rho \Im\left(\rho, I\right)_{|\rho = \rho_{\max}(I)}$.

Les données de simulation utilisées sont : Δt = 0.1s, $V_{\max}$ = 25m.s, $\rho_{\max}$ = 0.2veh/m, ΔN = 4, $I_{\max}$ = 5veh/m, $I_{\min}$ = 0veh/m. Nous présentons dans les figures ci-dessous les résultats de simulation d'un exemple numérique d'une jonction avec deux tronçons entrants et deux tronçons sortants, sur une longueur totale du réseau égale à 210 mètres, avec l'emplacement de la jonction (avec une longueur de l'intersection égale à 10 mètres) est 100 mètres.

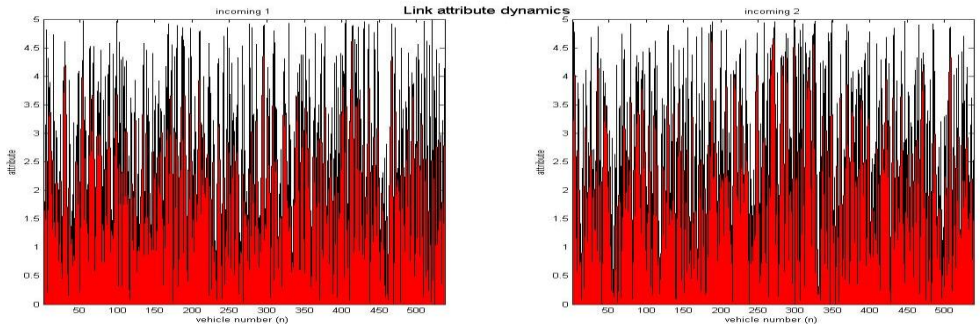


Figure 1. *Valeurs d'attribut de particules pour tronçon entrant 1 et tronçon entrant 2*

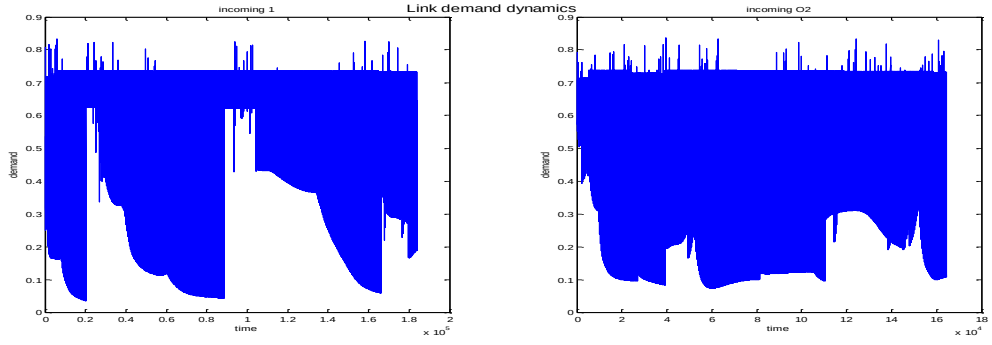


Figure 2. *Valeurs de demandes pour tronçon entrant 1 et tronçon entrant 2*

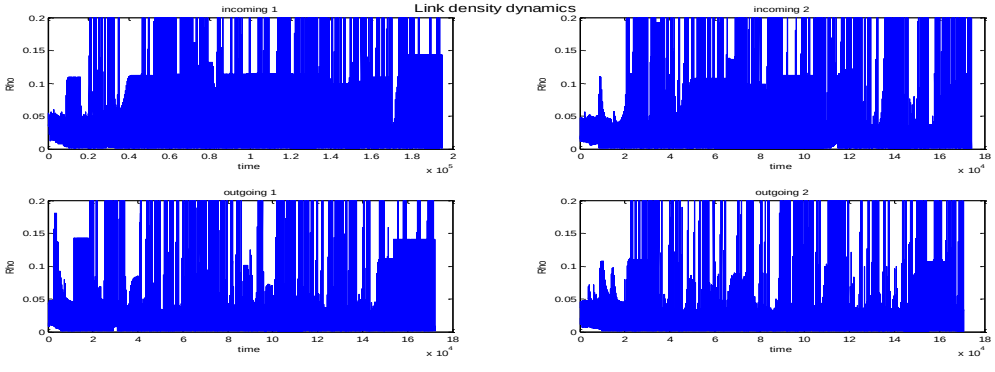


Figure 3. *Valeurs de densités pour les tronçons entrants et les tronçons sortants*

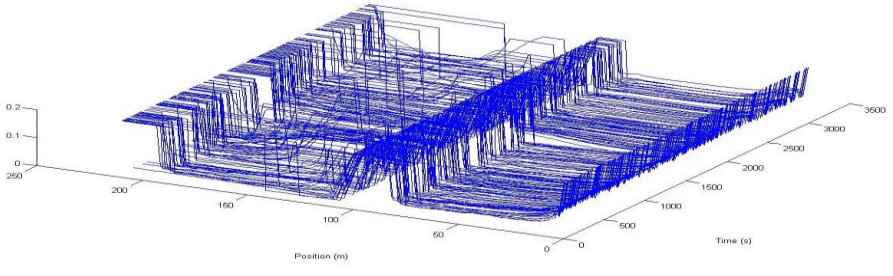


Figure 4. *Distribution des trajectoires de paquets de véhicules*

Nous remarquons dans cet exemple de simulation que notre méthode numérique peut récupérer avec précision à l'intersection (à une position égale à 100 mètres) l'onde de choc ou de décélération due à la congestion et à la formation de file d'attente en amont de la jonction (décélération des paquets de véhicules), et après l'onde de raréfaction ou d'accélération due à la diminution de la demande en amont, qui atténue la congestion plus tard.

6. **Conclusion**

En décomposant le problème en deux cas d'étude, le cas des conditions aux limites en amont et le cas des conditions aux limites en aval, la modélisation de l'intersection est étudiée dans ce papier. Nous avons discuté une nouvelle méthode numérique pour affronter la famille GSOM, posé sur une jonction. La formulation du modèle GSOM sous la forme d'un modèle de second ordre avec un diagramme fondamental translaté, fournit un très bon outil pour le calcul des conditions aux limites et la modélisation de l'intersection. L'approche de modélisation que nous avons proposée se base sur une approche physique qui a une plus grande efficacité du point de vue numérique ainsi que la prise en compte du principe fondamental d'invariance. Les méthodes existantes pour la modélisation de l'intersection au niveau des carrefours sont insuffisantes. Le modèle GSOM Lagrangien a été étudié sur des jonctions. Cela rend difficile d'exploiter les infrastructures de la circulation au maximum. Un passage plus efficace a été nécessaire afin d'améliorer la situation du trafic. Nous avons proposé alors dans ce cadre de nouveaux algorithmes de traitement des conditions aux limites en amont et en aval, ainsi que l'application d'un modèle d'intersection à état interne. Une perspective de la recherche serait de comparer les résultats numériques obtenus avec notre nouveau schéma monotone de modélisation de l'intersection et ceux obtenus à partir de l'approche variationnelle de [LEB 13] adaptée pour la modélisation de la jonction.

7. **Bibliographie**

[AW 00] Aw A. and Rascle M. Resurrection of second order models of traffic flow. In SIAM journal on applied mathematics. 2000.

[COL 02] Colombo R. M. Hyperbolic traffic flow model. In Mathematical and computer modeling. 2002.

[COS 15] Costeseque G., Lebacque J.-P., Khelifi A. Lagrangian GSOM traffic flow models on junctions. IFAC-PapersOnLine 48 (1). 2015.

[KHO 08] Khoshyaran M. M. and Lebacque J.-P. Lagrangian modelling of intersections for the gsom generic macroscopic traffic flow model. In Proceedings of the 10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation, Athens, Greece. 2008.

[KHO 09] Khoshyaran M. M. and Lebacque J.-P. A stochastic macroscopic traffic model devoid of diffusion. In Traffic and Granular Flow'07, Springer. 2009.

[LEB 07] Lebacque J.-P., Haj-Salem H., and Mammar S. Generic second order traffic flow modeling. In Proceeding of International Symposium on Transportation and Traffic Flow theory, London. 2007.

[LEB 13] Lebacque J.-P. and Khoshyaran M. M. A variational formulation for higher order macroscopic traffic flow models of the GSOM family. In Proceeding of International Symposium on Transportation and Traffic Flow theory. 2013.

[LIG 55] Lighthill M. J. and Whitham G. B. On kinematic waves II: A theory of traffic flow on long crowded roads. In ProRoySoc. 1955.

[RIC 56] Richards P. I. Shock waves on the highway. In Operations research. 1956.

[TRE 15] Treiber, M., Kanagaraj, V., Comparing numerical integration schemes for time-continuous car-following models. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2015.

[ZHA 02] Zhang H. M. A non-equilibrium traffic model devoid of gas-like behavior. In Transportation Research Part B. 2002.

[ZHA 09] Zhang P. E., Wong S. H. and Dai S. Q. A conserved higher-order anisotropic traffic flow model: description of equilibrium and non-equilibrium flows. In Transportation Research Part B: Methodological. 2009.

Vulnérabilité des territoires frontaliers par l'évaluation systémique de leurs mobilités

Thomas WAROUX[1]

Vincent BECUE[2], **Patrizia LAUDATI**[3]

[1]*Doctorant en cotutelle, Université de Mons, Département Projets, Ville et Territoire, Faculté d'Architecture et d'Urbanisme (FA+U) ; Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, Laboratoire en Design Visuel et Urbain (DeVisu), mail : Thomas.WAROUX@umons.ac.be*

[2] *Promoteur, Université de Mons, Département Projets, Ville et Territoire, Faculté d'Architecture et d'Urbanisme (FA+U), mail : Vincent.BECUE@umons.ac.be*

[3]*Promotrice, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, Laboratoire en Design Visuel et Urbain (DeVisu), mail : patrizia.laudati@univ-valenciennes.fr*

RÉSUMÉ.

Dans son évolution, la ville a considérablement été influencée par les mobilités successives. La construction des fonctions urbaines est dictée par les critères d'accessibilité et de temps. Cette proposition fait état du rapport de cause à effet entre ville et mobilité. Elle développe l'hypothèse de vulnérabilité des territoires transfrontaliers par leurs systèmes de mobilité. Cette hypothèse sera défendue au travers d'une évaluation systémique de la mobilité urbaine transfrontalière entre Mons et Valenciennes, territoire d'application.

ABSTRACT.

The city has been considerably influenced in its development by successive forms of mobility. The construction of urban functions is dictated by the criteria of accessibility and time. This proposal describes the cause and effect relationship between city and mobility. It speculates vulnérability of border territories by mobility systems. This research hypotheses will be defended through a systemic assessment of cross-border urban mobility between Mons and Valenciennes, application territory.

MOTS-CLÉS : mobilité urbaine, territoire transfrontalier, vulnérabilité, systémique.

KEY WORDS: urban mobility, cross-border territory, vulnerability, systemic.

1. Introduction

De la marche à pied à l'automobile, l'homme n'a eu de cesse d'accélérer ses déplacements. Au 19e siècle, l'avènement de la machine à vapeur et de l'industrialisation se sont accompagnés d'un exode rural massif. Sous le poids démographique, la ville s'est agrandie le long des lignes de transport, des chemins de fer et tramways. Après la seconde guerre mondiale, l'automobile se démocratise soutenue par une dynamique économique forte et un pétrole abordable. Les mouvements de population s'inversent et l'accessibilité à de nouveaux lieux pour un même temps de déplacement, engendre une périurbanisation massive des villes [BEA 06].

Beaucire [BEA 06] et Lhomet [LHO 13] démontrent l'influence de l'augmentation de la vitesse de nos déplacements sur la ville. Lhomet tout d'abord évoque les changements de civilisation depuis la marche à pied, l'énergie vapeur déterminante dans la construction du chemin de fer, à l'abondance du pétrole comme vecteur de l'automobile. Ces transitions énergétiques et ces changements de mobilité engendrent inexorablement un changement de la ville. Beaucire transpose cette augmentation de vitesse au lieu. L'automobile a permis la liberté d'accéder à de nouveaux lieux pour un même temps de déplacement. Ce rapport temps-distance devient le critère de construction de nouvelles formes urbaines. Il engendre une « déconcentration » et une « fragmentation » de la ville. Autrement dit une dé-densification du centre-ville et un étalement périphérique des villes. Beaucire conclut que « la vitesse est ainsi plus universelle que la densité » [BEA 06]. Pour autant, le critère de vitesse permettrait-il la définition de modèles de ville à l'instar de Newman et Kenworthy [NEW 91] ?

C'est un rapport de cause à effet qui relie les mobilités au rythme de la ville. Les différents modes de transport consécutifs sont ainsi constitutifs de la ville. Ils sont à la fois la genèse et la matière. On peut écrire l'histoire de la ville à travers l'évolution des mobilités [PAQ 96]. Les activités humaines influencent les besoins de déplacement et réciproquement. La mobilité n'est pas seulement technique, elle ne peut être considérée uniquement comme un système de déplacement. Elle est le lien entre les lieux de la ville. Elle rend accessible différentes réalités spatiales distantes dans l'espace et dans le temps. L'inter accessibilité d'un lieu rendant celui-ci accessible selon différents moyens de transport, c'est vers l'usager que se porte le choix du mode de déplacement.

Nous développons ces différents concepts de rapport entre la ville et ses mobilités sur un territoire spécifique : l'espace transfrontalier de Mons-Valenciennes. Territoire frontalier entre la France et la Belgique, il possède les caractéristiques d'un territoire de transition [GOT 52] : multiplicité des acteurs, dualité territoriale (aménagement, système urbain), modalités séparées. Il s'inscrit entre deux échelles urbaines : entre l'échelle métropolitaine transfrontalière et l'échelle rurale frontalière. L'hypothèse de cette recherche définit les territoires frontaliers comme plus vulnérables que les territoires états de par leur modèle urbain et leur système de transport.

Pour infirmer ou confirmer cette hypothèse, nous appliquons la triangulation systémique [DUR 02] comme outil d'observation et de compréhension des processus complexes. Elle appréhende la notion de système sous trois angles différents mais complémentaires : l'aspect structurel, fonctionnel et historique du système. Dans cette recherche, elle permet de modéliser le concept de vulnérabilité des territoires frontaliers par l'évaluation systémique de leurs mobilités.

2. Concepts et développement

Nous définirons tout d'abord ce rapport entre ville et mobilité et son influence sur son évolution morphologique. Nous développerons ensuite la notion de « frontière » comme objet de recherche. Au-delà des complexités actuelles des frontières de l'Europe, nous interrogeons ici l'avenir des territoires transfrontaliers et de leurs mobilités.

Les relations entre les réseaux de mobilités et la structure du territoire sont majoritairement reconnues par la communauté scientifique, aussi bien en ingénierie technique, qu'en urbanisme ou encore en sociologie. Pour autant cette relation ne parait pas unanimement réciproque tel que le démontre Jean-Marc Offner face au paradigme des *« effets structurants »* des systèmes de transport [OFF 93]. Ce rapport de cause à effet est nettement plus complexe. Il découle des difficultés d'appréhension du concept de mobilité urbaine, de son caractère polysémique et multidisciplinaire. Les premières études sur la définition « des mobilités » sont apparues dans les années 1920 avec, entre autres, les travaux de l'école de Chicago [KAU 11]. Elle s'attardera sur l'aspect spatiale de la mobilité et son impact sur la ville et son système social. Ces chercheurs étudieront les flux migratoires, la mobilité professionnelle jusqu'à la mobilité résidentielle. La morphologie urbaine et son évolution

par les réseaux de transport devient un indicateur des phénomènes sociaux. La mobilité différencie les pratiques résidentielles, influence les stratégies professionnelles ; elle conditionne l'évolution urbaine et social.

L'avènement de l'automobile développera à la même époque une nouvelle discipline : la science du trafic. Ses travaux ne porteront plus sur l'aspect sociologique de la mobilité mais développeront *des outils et des modèles de simulation des circulations* [KAU 11]. Pour ce faire, les ingénieurs des transports utilisent une collection de données pour identifier les problèmes de congestion d'un système de transport par exemple. Ils développent des simulations de l'augmentation de la demande et construisent des modèles technico-économiques de l'offre de transport.

La troisième étape de compréhension du concept mobilité découle, selon Kauffmann, de la nécessité de repenser la mobilité de manière intégrée ; en étudiant les rapports d'espace, de temps et d'évolution de la société [KAU 11]. Cet approche intègre les deux précédentes et propose une analyse socio-économique des transports au travers des disciplines économique, géographique et sociale.

Plus particulièrement, l'évolution de nos sociétés peut être exposée au travers de l'évolution de la mobilité. C'est la théorie soutenue par Newman et Kenworthy dans leur ouvrage « *Sustainability and Cities : Overcoming Automobile Dependence* » [NEW 99]. Ils décomposent l'évolution morphologique des villes en trois temps : la ville pédestre traditionnelle, la ville des transports en commun et la ville à dépendance automobile.

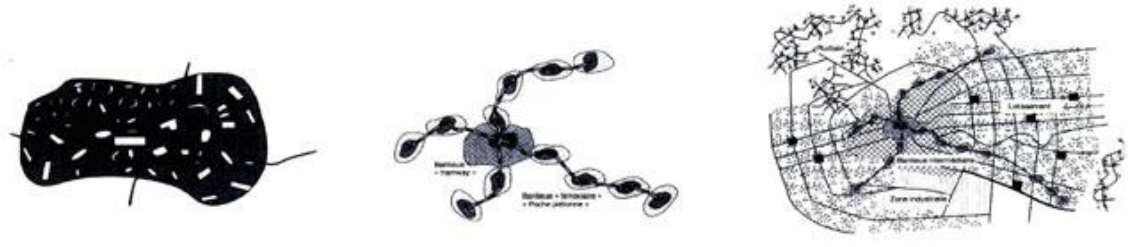


Figure 1. a. *la ville pédestre traditionnelle* **b.** *la ville des transports en commun* **c.** *la ville à dépendance automobile. [NEW 99]*

La ville pédestre traditionnelle (figure 1 a) fait référence à la majorité des centres historiques des villes européennes, « l'intra-muros » délimités par ses fortifications. Sa morphologie est basée sur le déplacement piéton caractérisé par une structure urbaine organique. Les rues sont étroites et l'occupation du sol importante. Du moyen-âge jusqu'au 19^{e} siècle ; elle accueille une importante densité de population (100 à 200 habitants par hectare) et une mixité des fonctions.

La ville des transports en commun (figure 1 b) se développe à la période industrielle et l'invention de l'énergie vapeur comme nouveau vecteur de mobilité tel que le présente Lhomet [LHO 13]. Les industries s'étendent en dehors des centres historiques et nécessitent une importante mains-d'œuvre. Les nouveaux systèmes de transport tel que le train et le tram relient le centre historique vers les industries. Des centres d'habitats suburbains se développent autour des arrêts et le long des lignes de transports. La morphologie de la ville est caractérisée par ses corridors mêlant transport, mixité des fonctions et moyenne densité de population (10 à 100 habitants par hectare).

La ville à dépendance automobile (figure 1 c) est finalement la conséquence de l'utilisation et de la démocratisation du mode de transport automobile. Elle s'accompagne d'un développement intensif des infrastructures routières et autoroutières, offrant la possibilité d'accéder à de nouveau lieu [BEA 06]. Cette liberté d'accessibilité génère de nouvelle forme d'habitat tel que la maison quatre façade avec garage, stéréotype du modèle urbain automobile, *« The Auto City »* [NEW 99]. La ville à dépendance automobile est déstructurée par cette liberté d'accessibilité, et se développe dans toutes les directions, c'est l'étalement urbain. Il imposera la nécessité d'une coordination de l'aménagement du territoire par la création des « *city planning* ». La ville automobile est caractérisée par ce développement anarchique. Les fonctions sont séparées et décentralisent la ville sous la forme d'une ville-territoire, à la faible densité de population (10 à 20 habitants par hectare).

Dans cette recherche, nous confrontons cette relation entre la ville et la mobilité dans son évolution sur un cas d'étude particulier : les territoires transfrontaliers. Ils sont définis par la présence d'une frontière qui sépare et délimite deux territoires états.

La « frontière » est plus que jamais au centre des préoccupations mondiales et européennes. La crise migratoire vécue dans l'Europe en cette année 2015 en est un exemple parmi d'autres : conflit entre Israël et Palestine, séparation des deux Corées ou de Chypres. La frontière révèle les rivalités et les revendications des états à jouir de leur territoire. A contrario, il existe au-delà de ses fermetures de frontières, des exemples d'ouverture et de coopération transfrontalière. La création de l'espace Schengen en 1995 a supprimé les contrôles aux frontières des états membres et signataires pour la libre circulation des biens et des personnes. La frontière oscille ainsi entre phase d'ouverture et phase de fermeture : la frontière est poreuse. « La porosité varie au cours du temps en fonction des relations entre systèmes en présence » [REI 04]. La frontière est un espace perçu et vécu différemment de part et d'autre. Les territoires frontaliers sont caractérisés par cette ambivalence, entre proximité et éloignement. Ils sont une juxtaposition de deux systèmes territoriaux distincts. Chaque partie revendiquant sa légitimité sur son propre territoire.

Pourtant, la coopération transfrontalière se développe dans divers domaines : l'économique (marché commun), le culturel (scène théâtrale transfrontalière) ou de la santé (pôle hospitalier transfrontalier). La coopération et l'échange de données sont plus complexes (à l'heure actuelle) en matière de sécurité (police européenne et fichier européen) ou de politique migratoire. Pour finir, certains domaines restent cloisonnés et séparés malgré l'ouverture des frontières européennes. C'est le cas du secteur des transports. Si la création de l'espace Schengen permet une plus grande mobilité des personnes et des marchandises, les choix modaux sont partagés. Ils s'effectuent majoritairement en voiture, et que très rarement en transport en commun. Cette distinction est marquée par les réseaux des systèmes de transport eux-mêmes qui depuis la fin de la seconde guerre mondiale, voient l'escalade du « tout voiture » et l'effondrement des transports publics vicinaux ou ferroviaires. Ce cloisonnement par la frontière tient également du fait d'une construction distincte du territoire, par le développement des outils réglementaires et normatifs de chaque pays ou région.

Toutefois cette porosité transfrontalière n'est pas universelle. Elle est à l'œuvre à différente échelle au sein d'espace métropolitain transfrontalier tel que Lille métropole, le grand Genève ou Liège, Maastricht, Aix-la-Chapelle. En dehors de ces agglomérations urbaines aux enjeux et aux dynamiques exacerbées ; les frontières suburbaines paraissent éloignées des réflexions de coopération. Cela est d'autant plus marqué dans le secteur des transports et de l'aménagement du territoire. Au-delà des projets transnationaux comme le TGV, de nombreuses lignes ferroviaires sont devenues de véritables culs-de-sac à l'approche des frontières. En France ou en Belgique (et dans la majoritairement en Europe occidentale) les réseaux de tramway ont quant à eux été démantelés au début des années 70 pour être remplacés par des lignes de bus. Inversement, les flux routiers ont augmenté de manière exponentielle, portés par une politique autoroutière forte. A travers l'histoire des transports, c'est l'histoire du territoire qui se dessine ; tel que l'évoque Marc Wiel dans son ouvrage : La transition urbaine, ou, Le passage de la ville-pédestre à la ville-motorisée [WIE 99].

Cette recherche propose donc d'analyser les concepts théoriques du rapport entre ville et mobilité aux territoires transfrontaliers. Pour ce faire, nous appliquons la méthode systémique pour évaluer la vulnérabilité de ses territoires.

3. Méthode systémique

L'utilisation de l'approche de la systémique dans cette recherche repose sur deux constats. Le premier constat est que les systèmes urbains sont complexes à appréhender. Leurs dimensions politiques, sociales ou structurelles impliquent une multitude d'acteurs, d'échange entre ses acteurs ; de critères et d'indicateurs multiples, d'échelle ou d'emprise multiple du territoire. Cette complexité est décuplée dès lors ou l'on étudie deux territoires distincts autour d'une même frontière. Le second constat découle du premier. Il traduit le manque d'information [ATL 86] sur les systèmes urbains frontaliers d'entre deux et la nécessité d'apporter de nouvelles formes de compréhension de ses territoires. Au-delà du manque d'information, c'est le manque de transposition qui complexifie les études transfrontalières, chaque état ayant son propre fonctionnement (politique, juridique…), sa propre représentation de son territoire.

Pour évaluer la vulnérabilité des territoires transfrontaliers par rapport aux territoires états, nous élaborons un outil de modélisation faisant appel aux méthodes systémiques, en particulier la triangulation systémique de Durand et Nunez [DUR 02] ; et les théories de la modélisation systémique de Le Moigne [LEM 94]. Les concepts de la systémique concordent avec notre objet d'étude. Les relations qui interagissent entre le temps, l'espace et les modes de déplacement à l'usager et ses comportements de déplacement [OFF 96] lui confèrent un niveau de complexité. C'est également le cas des nombreuses recherches sur le sujet, qui par l'approche systémique, hiérarchisent les composants de la ville. Comme Bonnafous et Puel [BON 83] qui émettent l'hypothèse « selon laquelle la ville peut être interprétée comme l'imbrication de trois sous-systèmes […] qui s'articulent les uns avec les autres selon des relations complexes de causalité. Les trois sous-systèmes sont : le système de localisation, le système de déplacement et le système de relations sociales ». Selon Bassand et Brulhardt [BAS 83] « la compréhension d'un type de mobilité spatiale passe par la prise en compte de la globalité de ce système […] les mobilités spatiales peuvent être expliquées par un modèle systémique ». Gallez et Kaufmann [GAL 09] dans *aux racines de la mobilité en sciences sociales*, font état d'une approche systémique mettant « en relation, sur un territoire, donné les comportements individuels et l'ensemble de l'offre de transports ».

La systémique est particulièrement adaptée à l'étude des phénomènes urbains. Elle se construit autour de la notion de système. Joël de Rosnay définit un système comme « un ensemble d'éléments interdépendants, liés entre eux par des relations telles que si l'une est modifiée, les autres le sont aussi et par conséquent tout l'ensemble est transformé » [DER 75]. La systémique porte ainsi autant d'importance aux composants du système (sous-systèmes) qu'aux relations les régissant. « Les problèmes de *système* [sont] des problèmes posés par un grand nombre de *variables* en interrelation » [BER 12]. Pour cette étude, c'est l'interrelation entre l'espace et le temps influencé par la mobilité qui nous permettra une meilleure compréhension du système, c'est à dire de la ville.

L'enrichissement de nos connaissances d'un système fait référence à la triangulation systémique (figure 2) comme outil d'observation et de compréhension des processus complexes. Elle appréhende la notion de système sous trois angles différents mais complémentaires : l'aspect structural, fonctionnel et historique du système.

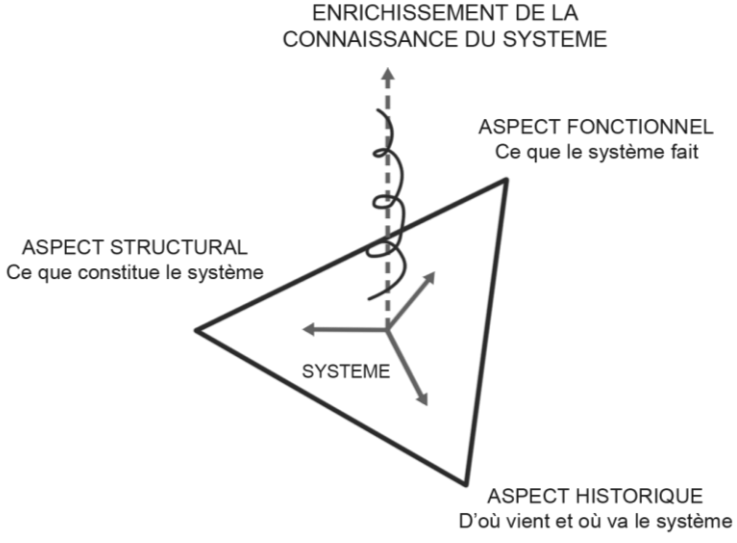


Figure 2. *La triangulation systémique d'après Durand et Nunez [DUR 2002]*

Dans son *introduction à l'approche systémique* [CER 07], le Certu[1] présente une approche systémique de la ville. Il définit l'aspect fonctionnel comme « l'utilisation d'énergie et l'élimination des déchets ; la production, la consommation et l'administration ; la culture et le loisir, l'information ; les communications et les transports » [DER 75]. *L'organisation structurelle* matérialise chaque fonction dans l'espace de la ville : « les logements, les commerces, les réseaux de communications, les systèmes de distributions de l'énergie… » Pour finir, l'étude historique est indissociable des fonctions et de la structure de la ville. Elle en est l'origine. C'est en comprenant d'où vient le système que l'on pourra en déduire où il va [DUR 02]. La méthodologie de la triangulation

[1] Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques.

systémique consiste à évaluer les 3 aspects l'un après l'autre tout en tenant compte principalement des liens qui interagissent entre-deux. La finalité de cet outil étant d'enrichir nos connaissances du système, sa compréhension ; et ce de manière non-exhaustive [DON 03]. Pour cette recherche, nous transposons les concepts de fonction, structure et histoire en fonctionnalité, typologie et morphologie.

Cette contribution s'attarde donc à définir les concepts de fonctionnalité, typologie et morphologie. Ces indicateurs systémiques sont appliqués sur notre territoire d'étude afin de valider notre hypothèse de recherche.

4. Application et résultats théoriques

Notre proposition porte sur les villes transfrontalières de Mons et Valenciennes, aux métriques partagés dans le temps : ligne de train, canal Mons-Condé, route nationale et tramway historique… Dans les années 1970, l'autoroute E19 entre Mons et Valenciennes est construite sur le lit de l'ancien canal. La ligne ferroviaire 97 est désaffectée faute de voyageur et les tramways démantelés. Aujourd'hui Valenciennes, comme plusieurs villes de France, a retrouvé son tramway. Mons construit une nouvelle gare pour relier les deux parties de la ville : le centre historique et l'extension des grands près.

Le choix de ce territoire d'étude est double. Il se situe entre deux modèles territoriales : les métropoles transfrontalières et les territoires ruraux transfrontaliers. Le territoire transfrontalier de Mons – Valenciennes s'inscrit ainsi dans une typologie urbaine, dont la densité de la population est supérieure à 150 habitants par km², selon l'OCDE [OCD 10]. Mais ses infrastructures de transport ne correspondent pas pour autant aux structures urbaines. La présence d'une frontière est, selon nous, un frein important à la construction d'un transport urbain transfrontalier alternatif à l'automobile.

Cette rupture peut être d'ordre politique, juridique ou encore technique. D'un point de vue réglementaire ; chaque pays, région ou commune est également souveraine en matière d'aménagement du territoire. En France avec le Plan de Déplacements Urbains (PLU) et en Belgique avec le Plan Communal de Mobilité (PCM), ainsi que d'autres outils de planifications ; les frontières sont persistantes et chaque document s'applique sur son propre territoire, à sa propre délimitation administrative.

Dans cette recherche, les indicateurs de fonctionnalité, typologie et morphologie tendent à dépasser les clivages politiques et administratifs. Ils s'appuient dès lors sur des données généralisées, européennes entre autres, ainsi que sur les méthodes nationales analogues tel que les statistiques (INS et INSEE), les données géographiques (IGN) ou cadastrale.

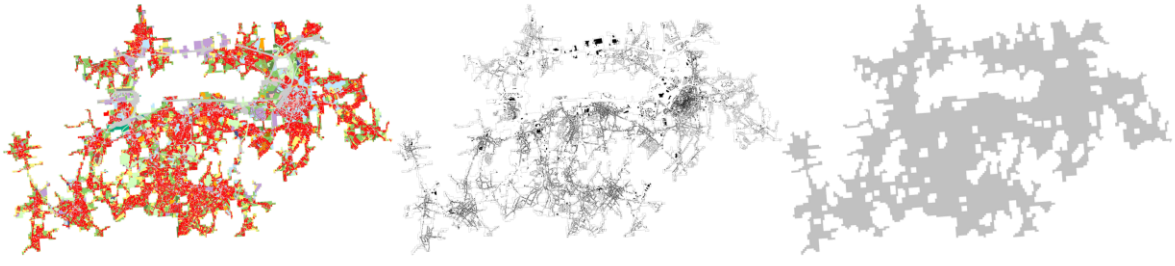


Figure 3. a. *fonctionnalité* **b.** *typologie* **c.** *morphologie [WAROUX]*

- La fonctionnalité (figure 3 a) : intègre les données d'utilisation et de comportement du territoire. Cet indicateur s'appuie sur les éléments cartographiques tels que l'occupation du sol ou *l'Urban Atlas* de l'agence européenne pour l'environnement (AEE). Il définit les densités urbaines : d'habitat (en rouge), d'emploi, de commerce ou de loisir (en mauve) ; les intensités urbaines : de flux de mobilité et de transport, d'activité économique ou d'emploi ; ainsi que les statistiques urbaines et sociales.
- La typologie (figure 3 b) : caractérise la configuration du territoire, à sa structure en terme de situation géographique et de surface. Cet indicateur est évalué selon des indices de distance : proximité urbaine ; de densité construite : bâtie et non bâtie (infrastructure, trame verte et trame bleue…).
- La morphologie (figure 3 c) : s'intéresse à l'évolution morphologique du territoire dans le temps. Cet indicateur fait référence à l'histoire du territoire et à ses changements morphologiques. Il utilise les cartographies nationales (IGN), les fichiers fonciers ou encore le *Corine Land Cover* de l'AEE.

Ces différentes données sont principalement utilisées dans un logiciel SIG (Système d'Information Géographique) ainsi que sous la forme de tableaux statistiques pour les données INS et INSEE. La méthode d'acquisition des données géographiques s'inscrit dans le caractère transposable de celle-ci. Le contexte de recherche transfrontalier impose en effet l'application d'une démarche d'encodage et de transposition des données similaires ou convertibles. C'est le cas des instituts de statistiques nationaux qui développent des méthodes comparables. Les découpages administratifs différents imposent néanmoins une adaptation. Dans le cas des systèmes de transport, principalement routier, nous utilisons des données *Open Source* telles qu'*Open Street Map (OSM)*[2]. En les comparant avec les données « officielles » de chaque pays ou région, il apparait qu'OSM est une source fiable à plus de 80%[3] et qui plus est généralisable puisqu'elle est développée universellement.

Les résultats de l'indicateur morphologique plus particulièrement, font état d'un important accroissement urbain après la seconde guerre mondiale et l'avènement de l'automobile tel que le démontre Newman et Kenworthy [NEW 99]. Auparavant, les villes de Mons et Valenciennes s'inscrivent toutes deux dans un centre historique délimité par des fortifications, démantelées depuis. S'ensuit une industrialisation massive du Borinage et du Valenciennois aux caractéristiques minières identiques. Le développement de l'exploitation houillère s'accompagne d'infrastructures ferroviaires et la construction de lignes de tram. Des bourgs se développent au point d'arrêts et le long des lignes de transport. L'après-guerre voit finalement la construction massive d'infrastructure routière au détriment du tram et du train.

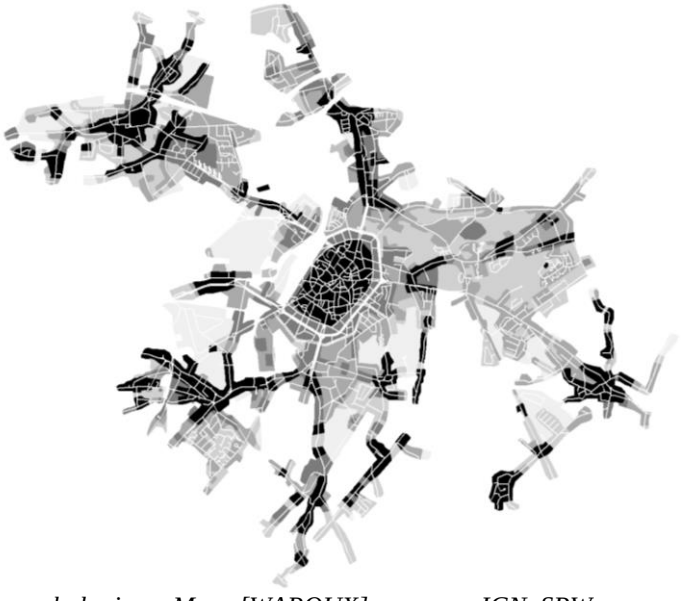


Figure 4. *Indicateur morphologique, Mons [WAROUX] sources : IGN, SPW*

Ces phases de développement morphologique de Mons (figure 4) et Valenciennes s'opèrent, selon nous, différemment dans le temps par rapport aux territoires états. Nous développons ainsi l'hypothèse d'un décalage morphologique, typologique et fonctionnel des territoires transfrontaliers par rapport aux territoires états. Cette hypothèse doit encore être affirmée ou confirmée. Elle repose, entre-autre, sur la comparaison entre l'indicateur morphologique précédent et l'évolution démographique (voir [ANT 07]). Cette dernière est saisie selon les recensements de l'Institut National de Statistique. Cette comparaison défini l'évolution de la consommation d'espace (Ha/100hab.) qui est in fine confrontée à l'évolution de longueur (en km) des réseaux de transport : routier, autoroutier, tramway et chemin de fer.

[2] OSM est une communauté de bénévole numérisant les différentes occupations du sol (routes, cours d'eau, constructions…) et vise à créer, à l'instar de *google maps*, une carte numérique du monde ; mais dans le cas d'OSM gratuite ! http://www.openstreetmap.org/

[3] Nous parlons bien dans ce cas des réseaux viaires, dont les données OSM sont utilisées dans les applications de géolocalisation et de système de navigation GPS. La communauté OSM est de ce fait plus « proactive » dans la mise à jour de ce type de donnée qu'elle ne l'est pour d'autre donnée tel que les bâtiments. Les zones bâties sont par exemple beaucoup plus numérisées en France qu'en Belgique.

Les premiers résultats de cette recherche exposent finalement le concept de *phénologie*[4] urbaine. Ce concept résulte de l'évolution périodique des systèmes de transport urbain transfrontalier entre Mons et Valenciennes. Tout comme leur frontière, les systèmes urbains frontaliers oscillent entre phase d'ouverture et phase de fermeture. Leurs systèmes de transport (voire même leur système urbain) varient périodiquement entre construction et déconstruction. Ce concept de phénologie urbaine appliqué au territoire transfrontalier de Mons et Valenciennes confirme l'hypothèse de vulnérabilité de ces territoires. En effet, la transposition de l'indicateur morphologique sur ce territoire ainsi que l'évolution des mobilités transfrontalières induit une phase de transition qui questionne l'avenir de ses territoires transfrontaliers et de leurs mobilités.

5. Conclusion et perspective

Depuis le 19e siècle, les villes et territoires ont considérablement évolué dans leur structure et leur morphologie. De nouvelles énergies ont permis l'augmentation de la vitesse de nos déplacements et l'accès à de nouveaux lieux. De la ville pédestre, à la ville automobile ; ces nouvelles mobilités ont engendré de nouveaux modèles urbains dictés aujourd'hui par le *« tout-voiture »*.

Cette recherche a pour particularité de s'interroger sur l'avenir d'un espace urbain spécifique : les territoires transfrontaliers. Caractérisés par la présence plus ou moins contraignante d'une frontière, ses territoires d'entre deux souffrent de cette ambivalence : multi territoires, multi acteurs, multi échelles, multi systèmes. Leur complexité induit l'utilisation de l'approche systémique et plus particulièrement de la triangulation systémique développée par Durand et Nunez.

Au travers de la triangulation systémique, nous développons notre méthode d'évaluation des territoires transfrontaliers et de leurs mobilités selon les concepts de fonctionnalité, typologie et morphologie. Leurs confrontations au territoire d'étude de Mons et Valenciennes a appuyé notre hypothèse de vulnérabilité des territoires transfrontaliers par leurs systèmes de mobilité.

Cette hypothèse de vulnérabilité ouvre désormais vers la recherche de scénarios prospectifs et résilients. Ils devront s'appuyer sur le concept de phénologie urbaine, de périodicité et de décalage urbain.

6. Bibliographie

[ATL 86] ANTONI J-P. ET YOUSSOUFI S., *Étalement urbain et consommation d'espace. Étude comparée de Besançon, Belfort et Montbéliard.* Revue Géographique de l'Est, Vol. 47/3, 2007.

[ATL 86] ATLAN H., *Entre le cristal et la fumée : essai sur l'organisation du vivant.* Collection Points sciences. Paris, Édition du Seuil, 1996.

[BAS 83] BASSAND, M. ET BRULHARDT, M.-C., « La mobilité spatiale : un processus social fondamental ». *Espace, populations, sociétés*, p. 49‑54, 1983.

[BEA 06] BEAUCIRE F., *Ville compacte, Ville diffuse*. Présenté à 601e Conférence de l'Université de tous les savoirs. Consulté à l'adresse https://www.canal-u.tv/video/universite_de_tous_les_savoirs/ville_compacte_ville_diffuse_francis_beaucire.1463, 2006.

[BER 12] BERTALANFFY, L. VON, *Théorie générale des systèmes*. (E. Laszlo, J.-B. Chabrol, et B. Paulré, Trad.). Paris : Dunod, 2012.

[BON 83] BONNAFOUS, A. ET PUEL, H., *Physionomies de la ville*. Série « Initiation économique ». Paris : Editions ouvrières. Consulté à l'adresse http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/17/17/41/PDF/Physionomies_de_la_ville.pdf, 1983.

[CER 07] CERTU, *Une introduction à l'approche systémique*, 2007.

[4] Étude de l'influence des climats sur les phénomènes biologiques saisonniers végétaux (feuillaison, floraison, etc.) et animaux (migration, hibernation, etc.). (Larousse)

[OCD 10] OCDE, *OECD Regional Typology*, Directorate for Public Governance and Territorial Development, 2010.

[DER 75] DE ROSNAY, J., *Le Macroscope : vers une vision globale*. Points ; 80. Paris : Éditions du Seuil, 1975.

[DON 03] DONNADIEU, G., DURAND, D., NEEL, D., NUNEZ, E. ET SAINT-PAUL, L., *L'Approche systémique : de quoi s'agit-il ?* Synthèse des travaux du Groupe AFSCET « Diffusion de la pensée systémique ». Consulté à l'adresse http://www.afscet.asso.fr/SystemicApproach.pdf, 2003.

[DUR 02] DURAND, D. ET NUNEZ, E., *Pour une pédagogie opérationnelle de l'approche systémique*. Consulté à l'adresse http://www.res-systemica.org/afscet/resSystemica/Crete02/DurandNunez.pdf, 2002.

[GAL 09] GALLEZ, C. ET KAUFMANN, V., *Aux racines de la mobilité en sciences sociales.* Histoire (Presses Universitaires de Rennes.), 2009.

[GOT 52] GOTTMANN, J., « La Politique des Etats et leur géographie », *Revue française de science politique*, (4), pp. 831‑833, 1952.

[LEM 94] LE MOIGNE, J. L., *La théorie du système général : Théorie de la modélisation.* Paris : Presses universitaires de France, 1994.

[LHO 13] LHOMET, E., *Histoire des systèmes de mobilité de l'agglomération bordelaise.* Liège. Consulté à l'adresse http://dgo4.spw.wallonie.be/dgatlp/Colloque/2013_Communaute/programme.asp, 2013.

[NEW 91] NEWMAN, P. W. G. ET KENWORTHY, J. R., *Cities and automobile dependence*. Aldershot [u.a.] : Avebury Technical, 1991.

[NEW 99] NEWMAN, P., *Sustainability and cities: overcoming automobile dependence.* Washington, D.C : Island Press, 1999.

[OFF 96] OFFNER, J.-M., « Politique de la navigation à vue ». *Urbanisme* n°289, p. 47‑50. Paris, 1996.

[PAQ 96] PAQUOT, T., « Ouverture-Dossier Transport ». *Urbanisme*, n°289, Paris, 46, 1996.

[REI 04] REITEL, B., Frontière - Hypergéo. Hypergeo. Consulté à l'adresse http://www.hypergeo.eu/spip.php?article16, 2004.

[WIE 99] WIEL, M., *La transition urbaine, ou, Le passage de la ville-pédestre à la ville-motorisée*. Architecture + recherches. Sprimont, Belgique : Mardaga, 1999.

Vers un Quartier Zéro Energie (QZE) : une approche méthodologique

Sesil Koutra[1], Vincent Becue[2], Mohammed-Anis Gallas[3], Christos S. Ioakimidis[4]

[1]*Université de Mons, Département Faculté d'Architecture et d'Urbanisme, mail : sesil.koutra@umons.ac.be*

[2]*Université de Mons, Département Faculté d'Architecture et d'Urbanisme, mail : vincent.becue@umons.ac.be*

[3] *Université de Mons, Département Faculté d'Architecture et d'Urbanisme, mail : Mohamed-Anis.GALLAS@umons.ac.be*

[4]*Université de Mons, ERA Chair Holder Net-Zero Energy Efficiency on City Districts, mail : christos.ioakeimidis@umons.ac.be*

RÉSUMÉ. *La stratégie 'Energie 2020' affirme que le futur de l'industrie, l'économie et la population dépendent de l'énergie durable et abordable et confirme les objectifs '20-20-20' à réduire l'effet de serre de 20%, l'augmentation de l'énergie renouvelable à 20% et une amélioration de 20% de l'efficacité énergétique. Le défi majeur, aujourd'hui, est l'adaptation et la modernisation des bâtiments existants afin d'atteindre un équilibre annuel de zéro énergie à l'échelle d'un quartier dans le but d'atteindre le niveau d'autonomie énergétique. La recherche introduit la notion de 'smart ground' guidée par : (a) la localisation d'un quartier et (b) la morphologie pour assurer sa viabilité. Trois leviers d'action ont été développés afin de définir son contexte : 1. L'optimisation des besoins actuels en énergie, 2. L'hybridation énergétique et 3. L'organisation du stockage (en termes d'énergie, eau et déchets). Ce travail ouvre de nombreuses futures perspectives de recherche qui devraient être largement étudiées afin de développer les besoins dans un contexte concret et opérationnel. Le but de cet article est de proposer une approche méthodologique pour l'encadrement d'un quartier zéro énergie via l'approche systémique et le développement d'un outil d'évaluation pour examiner l'opportunité d'étendre le concept à l'échelle du quartier.*

ABSTRACT. *The strategy 'Energy 2020' affirms that the future of the industry, economy and population depend on sustainable and affordable energy and confirms the objectives of '20-20-20' to reduce the greenhouse effects by 20%, increase the use of renewable energy at 20% and improve the energy efficiency at 20%. The major challenge, today, is the adaptation and modernisation of the existing buildings to achieve annual zero energy balance at a district level in order to reach the energetic autonomy. The research introduces the concept of 'smart ground' guided by: (a) the location of the district and (b) the morphology to ensure its viability. Three levers are developed to define its context: 1. Optimisation of actual energy needs, 2. Energetic hybridization and 3. The organisation of energy storage (in terms of energy, water and waste). This works opens numerous perspectives for future research that should be extensively studied to develop the requirements in a practical and operational context. The purpose of this article is to propose a methodological approach to frame the net zero energy district through the systemic approach and the development of an evaluation tool to examine the advisability of extending the concept to the district level.*

MOTS-CLÉS : *quartier, énergie, évaluation, 'smart', systémique, outil*

KEY WORDS: *district, energy, evaluation, 'smart', systemic, tool*

1. Introduction

Depuis le rapport Brundtland en 1987, les questions liées au développement durable ont investi le champ de l'architecture et de la ville [AUB 08]. Les premiers travaux sur le développement durable se sont d'abord concentrés sur des thèmes circonscrits (et pas forcément sur les territoires urbains). Le rapport Brundtland 'Notre avenir à tous' [WCED 87] évoque les problèmes de la consommation énergétique des villes. Il a fallu attendre 1988 pour que le terme 'ville durable' apparaisse, dans le cadre du programme 'MAB' (Man and Biosphere) de l'Unesco consacré à l'écologie urbaine [VAL 09]. En 1992, les actes du sommet de Rio ont mis en avant les villes comme espace de réflexion fondamentale sur les questions environnementales et l'agglomération urbaine comme échelle pertinente d'action. Il apparaît ainsi clairement que les questions de développement durable sont au cœur de la pratique des architectes depuis la démarche HQE (Haute Qualité Environnementale, 1990) pour ce qui est de l'échelle du projet architectural, et que l'évolution vers les questions urbaines de ces différentes réflexions impactent aussi l'échelle du projet urbain [AUB 08].

Durant ces deux derniers siècles, l'augmentation de la part de la population urbaine mondiale, amplifiée par le phénomène d'explosion démographique, a été sans précédent et atteint 60% de la population totale d'ici à 2030 avec les impacts négatifs, les émissions de CO_2, etc. Pour répondre à ces phénomènes, dans un cadre législatif approuvé [EU 10], le Parlement Européen propose des innovations et pratiques orientées vers le concept 'zéro énergie' [GRU 12]. Ces tendances actuelles nécessitent sans doute des systèmes multi-énergies qui émettent moins de carbone et consomment moins d'énergie [ALL 15]. Actuellement, la problématique des bâtiments en zéro énergie a suscité un intérêt croissant au niveau international vers des solutions pour un environnement urbain et plus durable. Par conséquent, le défi majeur, aujourd'hui, est l'adaptation des bâtiments existants afin d'atteindre un équilibre annuel de zéro énergie à l'échelle d'un quartier et à mettre en évidence les paramètres urbains et architecturaux qui agissent sur son bilan énergétique dans le but d'atteindre le niveau d'autonomie énergétique. La réalisation d'un quartier à faible taux d'émissions de gaz carbonique ou de basse énergie dépend non seulement de la performance énergétique mais aussi de la durabilité de la planification urbaine [EU 11].

Le but de cet article est d'examiner l'opportunité d'étendre le concept d'un bâtiment zéro énergie à l'échelle du quartier en tenant compte deux axes principaux :

1. L'impact de la typologie et morphologie urbaine afin de réduire les besoins énergétiques, les déplacements et les émissions de CO_2.
2. L'impact de la localisation (site géographique, caractéristiques naturelles, etc.) sur la consommation et production d'énergie locale (potentiel en ressources naturelles, etc.).

La méthodologie propose un cadre simplifié pour étudier la faisabilité du quartier zéro énergie selon l'approche systémique et les trois leviers d'action qui concernent : (A) L'optimisation de besoins actuels en énergie, (B) L'hybridation énergétique et (C) L'organisation du stockage.

1.1. L'échelle du quartier

A travers les nombreuses définitions et diagnostiques d'un projet urbanistique, la réflexion de la dimension humaine est de la plus haute importance. Opérationnelle, avec un contexte d'une micrographie d'une ville, le quartier est considéré comme un système complexe, une micrographie d'une ville mais avec une dimension plus ciblée qu'une ville (ou un territoire) mais en même temps rend possible l'application et l'utilisation d'outils d'évaluation. D'après Cherqui [CHE 05], le quartier apparait comme une échelle pertinente et judicieuse pour mettre en place une démarche de développement durable. Selon Valdieu [VAL 05], l'échelle du quartier s'avère pertinente dans une approche de développement plus homogène qui permet d'expérimenter des mesures appropriées au territoire et à ses spécificités. Entre le bâtiment et la ville, le quartier propice à la mobilisation citoyenne et des acteurs locaux [RUE 14]. Malgré la difficulté de définir le contexte du quartier, trois postulats le résument bien d'après Salmon [SAL 11]: (1) un cadre de vie sociale, (2) une autonomie d'activités et des ressources et (3) des relations de proximité comme élément constructif d'une ville.

1.1.1. Le quartier durable

En 1990, les premières expérimentations et opérations-pilotes des éco-quartiers sont mises en route (exemples de Vauban, BO01 Malmö, Kronsberg, etc.) [RUE 14]. La démarche d'éco-quartier vise à favoriser l'émergence d'une nouvelle manière à concevoir les éléments de la ville contemporaine. L'aspect du quartier durable inclut l'aménagement durable, la localisation du projet, la participation des citoyens mais aussi des aspects liés au cadre de la vie sociale (mixité sociale, densité, etc.) ainsi que la préservation des ressources naturelles et la protection

de l'environnement [MIN 14]. Au niveau européen, une référence pour la définition d'un éco-quartier vient suite à l'accord de Bristol (2005) ou l'éco-quartier est définit comme : *'Une zone mixte utilisée avec un sentiment de communauté et un endroit où les gens veulent vivre et travailler qui doit répondre aux divers besoins actuels de ses utilisateurs et contribuer à une meilleure qualité de leur vie'.* Energy Cities[1] proposent que l'éco-quartier doive fonder aux points suivants :

- ✓ ***Gouvernance :*** participation efficace des utilisateurs à travers d'une promotion de la communication et de la co-création entre les citoyens et les résidents du quartier afin d'animer une implication active dans l'intérêt de la pérennité du projet.
- ✓ ***Transport et mobilité*** : quartiers bien connectés et accessibles avec une bonne infrastructure des moyens de transports, essentielle pour la limitation de la voiture.
- ✓ ***Environnement*** : opportunité de vivre dans le respect de l'environnement (bâtiments basse ou zéro consommation énergétique, limitation des déchets, utilisation de matériaux naturels, etc.)
- ✓ ***Mixité*** : sociale et fonctionnelle (lieu d'habitation, travail, divertissement, commerce, etc.)

Actuellement, plus de 200 projets d'éco-quartiers existent dans le monde qui se différencient par leurs caractéristiques, leur contexte, leurs techniques et technologies innovantes qui s'intègrent dans leur modèle d'urbanisation. Selon Salmon [SAL 11], les phares des éco-quartiers existants sont : 77 en Amérique, 5 en Chine, 1 aux Emirats Arabes Unis, 1 en Inde et 148 en Europe avec une superficie variante ente 1.7 et plus de 200 hectares qui concernent de 250 à 50.000 résidents. A noter, également que 148 éco-quartiers sont répertoriés en Europe, dont 90 en France (Fig. 1).

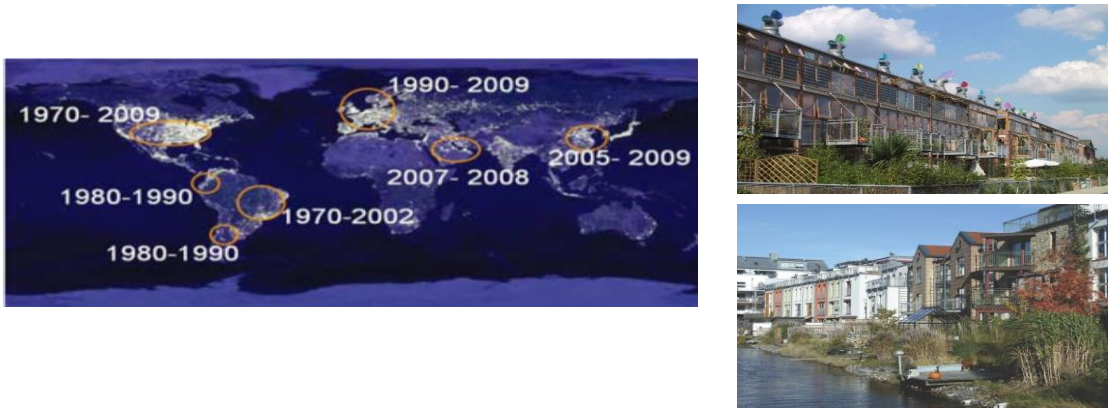


Figure 1 : *Localisation des éco-quartiers dans le monde et exemples typiques (BedZED et BO01 Malmö)*

1.1.2. Critique

Depuis la conférence de Rio (1992), de nombreux quartiers européens s'autoproclament 'quartiers durables' ou 'éco-quartiers', mais en réalité leurs objectifs initiaux sont finalement rarement atteints [SAH 08] :

a) Réduction des émissions CO_2 : la démarche adoptée par les éco-quartiers européens inclut principalement la réduction des émissions du carbone qui provient par la consommation d'énergie des bâtiments.

b) Préservation de ressources naturelles : cet axe focalise surtout à la préservation de ressources naturelles et la biodiversité.

c) Amélioration de la qualité et du cadre de vie : politiques pour la réduction du niveau de bruit et des solutions pour la gestion des déchets.

1.1.3. L'analyse des dix quartiers durables Européens : Un état-de-l'art

Dans un premier temps, l'analyse de cette étude a inclus un état-de-l 'art de dix nouveaux quartiers durables à l'échelle européenne, représentatives en littérature pour nombreuses raisons (Fig.2) :

- ✓ Plus de 50% des projets sont conçus dans cette zone géographique et sont déjà construits

[1] http://www.energy-cities.eu/, Energy Cities : l'Association Européenne des autorités locales en transition énergétique

- ✓ Leur date de création s'étend entre 1994 et aujourd'hui, donc ils ont déjà quelques 'années de vie'
- ✓ Leurs retours d'expériences ont été déjà publiés

Figure 2 : *Implantation des éco-quartiers étudiés*

Il est vrai que le choix de ces projets peut sembler ordinaire, étant donné qu'ils ont déjà été médiatisés en littérature, par rapport au caractère innovant d'un quartier zéro énergie. Cependant, leur contexte reste a priori intéressant dans un premier temps pour un état-de-l'-art qui permet une comparaison pertinente et offre un potentiel de données et de retour d'expériences grâce à leur médiatisation.

2. Le concept 'zéro énergie'

2.1. Bâtiment zéro énergie

Afin de répondre aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effets de serre et de sécurité d'approvisionnement énergétique, l'Union Européenne a mis en place diverses mesures dont des directives relatives à la Performance Energétique des Bâtiments. Durant ces dernières années, le concept 'Bâtiment Zéro Energie' (Net Zero Energy Building) a suscité un intérêt croissant à l'échelle internationale dans la littérature scientifique [MAR 14]. La Directive 2002/91/CE vise à l'amélioration de l'efficacité énergétique et après plusieurs adaptations, elle fait objet de la Directive 2010/31/CE qui décrit dans l'article 9 l'exigence que *'tous les bâtiments neufs devront être à consommation d'énergie nulle (ou quasi nulle) d'ici 2020 et ceux qui sont occupés ou possédés par autorités publiques devront l'être d'ici 2018'.* L'article 2 définit le concept zéro énergie comme *'le bâtiment dont la consommation (annuelle) nette d'énergie est nulle et sa consommation annuelle globale d'énergie primaire est inférieure ou égale à la production locale d'énergie à partir de sources renouvelables'* [SPW 10]. De nombreuses définitions sont proposées pour opérationnaliser l'approche du 'zéro énergie' surtout en fonction des politiques ciblées par les autorités. Un bâtiment zéro énergie est caractérisé au stade de sa conception par des performances énergétiques proches ou équivalentes de celles du standard passif (ou bioclimatique) au niveau de l'enveloppe et d'autre part de la production locale d'énergie renouvelable en utilisant le potentiel du site. Sartori et al [SAR 12] proposent un cadre pour la définition du bâtiment zéro énergie sur la base de l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments et leurs connexions avec les réseaux énergétiques dans le bût d'apporter la [1] pour l'équilibre de l'énergie apportée et demandée :

$$\text{Bilan : } |\text{apport pondéré}| - |\text{demande pondérée}| > \text{ou} = 0 \qquad [1]$$

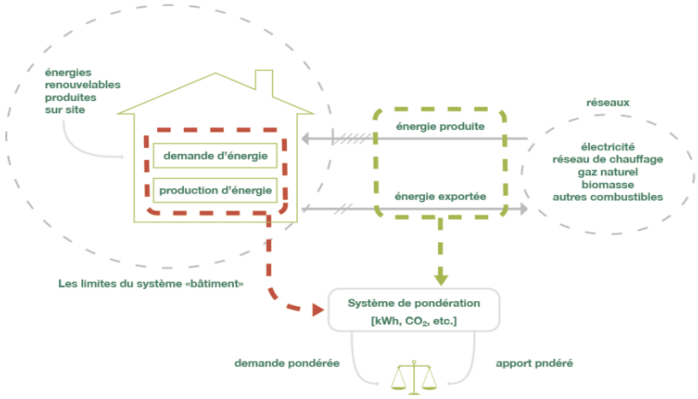


Figure 3 : *Schéma de principe des connections entre le bâtiment et les réseaux [SAR 12]; traduit en français, adapté par [MAR 14]*

Sartori et al définissent le bâtiment comme un système avec des limites qui inclut : (a) les limites physiques et (b) les limites de l'équilibre qu'elles déterminent. Les énergies utilisées qui sont considérées dans la [1]. La condition d'équilibre est satisfaisante lorsque l'apport pondéré atteint ou dépasse la demande pour une période fixée (théoriquement pour une année). Les bâtiments zéro énergie ou les bâtiments zéro énergie nette sont tous les deux capables de produire de l'énergie à partir de sources renouvelables sur le site pour compenser leur demande en énergie. Mais un NZEB (Net Zero Energy Building) est un bâtiment connecté à une infrastructure énergétique (par exemple le réseau électrique ou un réseau de chauffage urbain) tandis qu'un ZEB (Zero Energy Building) est un bâtiment autonome. Dans le premier cas, il existe un équilibre sur une période de temps (généralement une année) entre l'énergie prélevée aux réseaux énergétiques et celles fournies à ces réseaux. Ces deux concepts peuvent être étendus à l'échelle d'un quartier. On parle alors de quartiers zéro énergie (Zero Energy Districts (ZED)) ou de quartiers zéro énergie nette (Net Zero Energy Districts (NZED)) [ERA 15].

2.2. Quartier zéro énergie (QZE)

L'évolution des questions d'énergie et de changement climatique 'oblige' les autorités locales à redéfinir la façon du développement de leurs territoires (quartiers, villes, etc.) en tenant compte de l'importance l'environnement et de l'énergie [ADE 08]. Selon Marique & Reiter [MAR 14], le cadre d'un quartier zéro énergie s'articule autour de trois axes principaux : (1) la consommation énergétique dans les bâtiments, (2) l'intégration des énergies renouvelables et (3) la consommation d'énergie relative à la mobilité et aux transports et en première approche est défini par analogie d'un bâtiment zéro énergie. En générale, les études qui concernent le contexte d'un quartier zéro énergie ne sont pas nombreuses en bibliographie et sont focalisées sur l'impact des formes urbaines sur la consommation énergétique des bâtiments d'un quartier ou sur le potentiel d'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage ainsi que pour la production d'électricité photovoltaïque, l'éclairage, etc. [MAR 14].

On remarque des études de cas particuliers qui incluent à leurs objectifs le contexte de l'énergie : le quartier BedZED à Sutton (Angleterre) dont l'ambition initiale était le développement avec un bilan carbone égal à zéro, le quartier Mené dans les Cotres d'Armor en Bretagne engagé pour une politique énergétique visant l'autosuffisance à l'horizon 2025 [JAD 15] ou le ***quartier Hikary à Lyon qui consiste le premier ilot mixte à énergie positive en Europe***. Hikari assure la production d'énergie par des panneaux photovoltaïques installés en combinaison des meilleurs techniques de l'architecture bioclimatique et consomme 50% de moins que les normes de la réglementation thermique actuelle en produisant une quantité d'énergie supérieure à ses consommations (environ 0.2%) [TOL 16].

3. Méthode d'évaluation

3.1. Approche systémique

L'approche systémique – parfois nommée 'analyse systémique' – est une méthode interdisciplinaire qui vise à appréhender des objets dans leur complexité en tenant compte de leur environnement, fonctionnement et mécanismes. L'objectif de cette méthode est de considérer l'objet étudié comme un système qui est défini comme un ensemble d'éléments en interaction dynamique (Fig. 4) [DON 03]. L'approche systémique observe les composantes du système et puis établit les interactions entre les éléments et leurs conséquences afin de pouvoir ensuite analyser ses interdépendances.

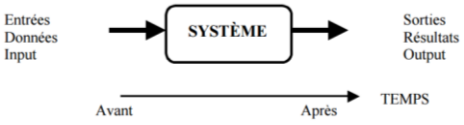
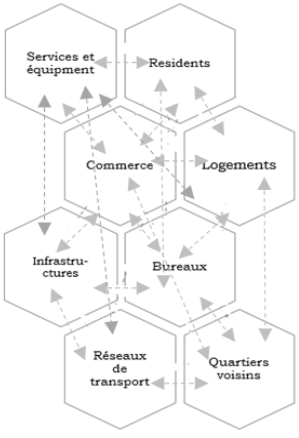


Figure 4 : *L'idée de l'approche systémique*

Un quartier peut aisément être perçu comme un ensemble complexe constitué de plusieurs entités qui sont interdépendantes (Fig.5), mais il est important de souligner que ses composantes interagissent continuellement avec celles des quartiers voisins. Ensuite, la notion de 'zéro énergie' est appliquée en utilisant le système du 'quartier' de la Fig. 5. L'idée d'utiliser l'approche systémique afin de décrire le quartier zéro énergie est principale pour le cadre méthodologique développé vu que le quartier est considéré comme un block urbain et un système complet. En générale, le 'quartier' comme projet urbain est caractérisé par sa complexité (divers acteurs et éléments avec différentes thématiques et interactions). Afin d'analyser ces interdépendances, il est proposé de développer l'approche systémique qui permet de réduire cette complexité des éléments élémentaires.

Le système du QZE est caractérisé par une implantation, des systèmes internes (gestion d'eau, déchets, électricité, etc.), des besoins (énergie, eau potable, etc.) ainsi que par des sources d'énergie disponibles sur le site et d'autres hors site (entrées du système). De manière similaire, les 'sorties' sont définies : des consommations, des émissions de CO_2, une production d'énergies renouvelables et du stockage. Afin que le quartier soit 'zéro énergie', il faut que ces entrées et ces sorties soient annuellement équilibrées au niveau énergétique comme la Fig. 6.



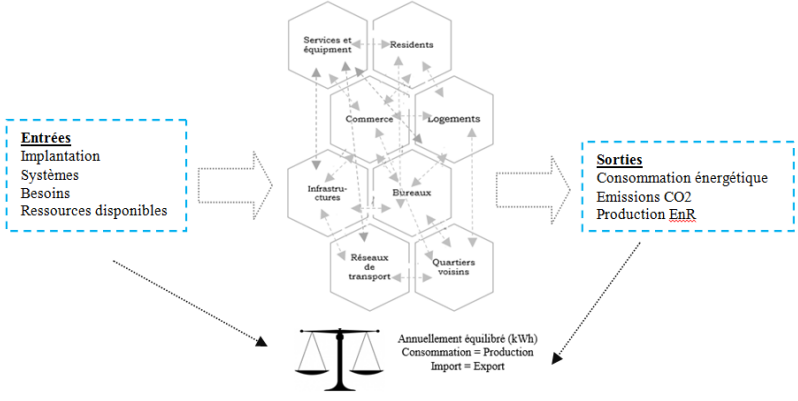


Figure 5 : *Représentation du système « quartier »* **Figure 6 :** *Représentation systémique d'un QZE*

3.2. Critères d'évaluation

La deuxième étape de la méthodologie inclut l'approche préliminaire d'une analyse multicritère (qualitatives-jaune et quantitatives-bleu) qui permet de mieux visualiser les liens entre les composants majeurs d'un quartier et la compréhension de l'équilibre énergétique. L'idée de l'approche multi-critère est d'analyser en façon détaillée les paramètres, les critères et les facteurs qui ont une influence sur le terrain afin de le transformer en concept zéro énergie. La seconde phase de cette analyse inclut leur pondération et classification.

Fig.7 symbolise les liens de dépendances entre les entrées et les sorties du système du quartier. Le résultat préliminaire de l'approche systémique est synthétisé par le graphique ci-après et il sera analysé et complété à une étape ultérieure en soulignant le facteur humain ainsi que le comportement des utilisateurs et résidents. Le changement de comportement des consommateurs est déterminant pour assurer la réussite et la viabilité d'un quartier zéro énergie.

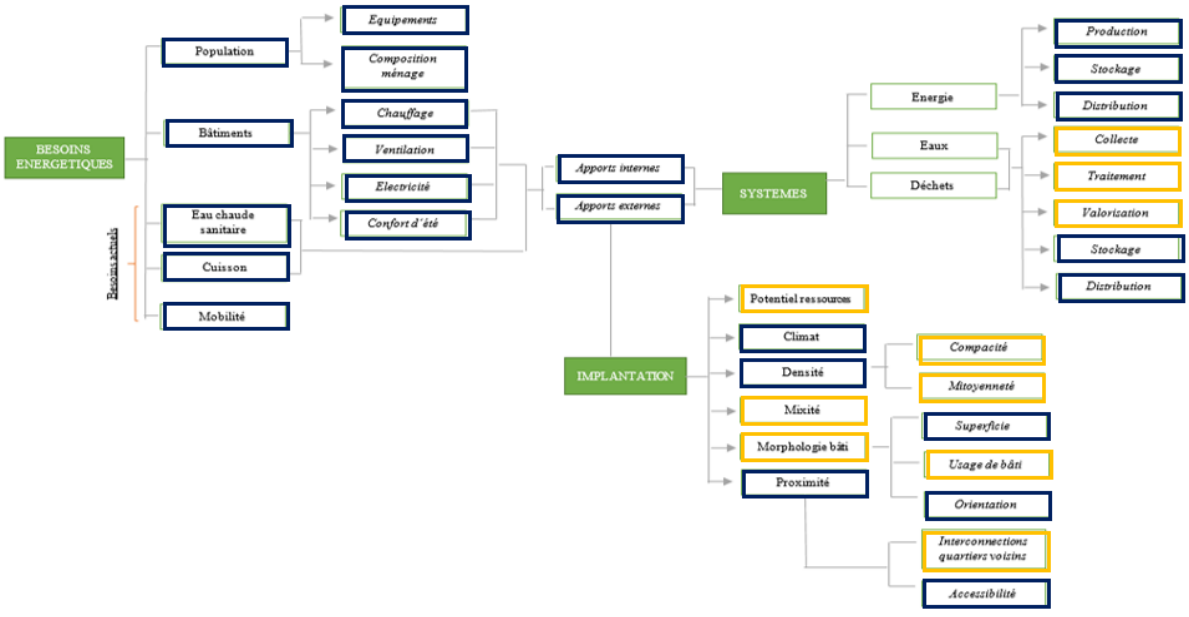


Figure 7 : *Approche systémique des interactions entre les éléments d'un quartier*

3.3. Développement d'outil d'évaluation : 3 leviers d'action

L'analyse graphique des différentes interactions identifie les liens entre les différents éléments fondamentaux du quartier et détaille leurs interactions. Trois branches d'étude sont proposées : (1) les besoins énergétiques, (2) les systèmes et (3) l'implantation. A partir de l'identification de ces 3 axes, trois leviers d'actions afin d'arriver, à terme, à un quartier zéro énergie en influençant le système du 'quartier' :

1. *Optimiser les besoins* : en analysant les chiffres et les distances clés du site, les choix d'implantation et d'organisation ainsi qu'en comparant les objectifs chiffrés initiaux pour la consommation réelle.
2. *Utiliser l'hybridation énergétique* : en analysant le potentiel du site, les systèmes énergétiques et les technologies mises en place ainsi que leur viabilité.
3. *Organiser le stockage* : en analysant les systèmes mis en œuvre et leur efficacité. Le stockage énergétique permettrait de répondre aux différents pics de consommation mais également de distribuer l'énergie nécessaire en fonction des divers locaux ou des périodes d'utilisation

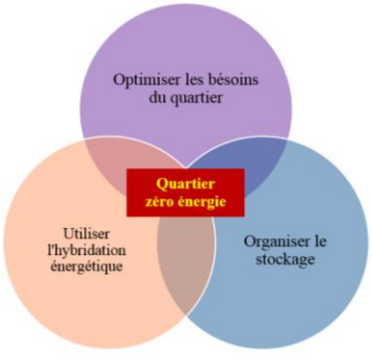


Figure 8 : *Quartier Zéro Energie : trois leviers d'action*

3.4. Evaluation d'études de cas

Une fois que les leviers d'action sont définis (Fig.8), l'analyse approfondit les données recueillies afin de conclure plus précisément sur les bonnes et les mauvais pratiques étudiées (10 études de cas). Cette tâche a nécessité des données précises et actualisées qui n'étaient pas toujours évidentes. Les différentes fiches dans le cadre de cette analyse sont réalisées en deux phases : (1) Description du quartier et (2) Evaluation du quartier par rapport aux critères analysés et définis. D'après cette analyse quatre projets éco-quartiers : BO01 (Malmö),

Kronsberg (Hanovre), Eva-Lanxmeer (Culemborg) et Pic-Au-Vent (Tournai) sont évalués et considérés possibles (par rapport aux critères définis) à se transformer dans le contexte du QZE.

4. Bilan - Conclusions

L'objectif majeur de cette recherche conduit à identifier et analyser les paramètres liés à la localisation et à la morphologie d'un quartier afin de se transformer en zéro énergie. Le but était également de démontrer que sans des choix urbanistiques pertinents, en amont de la conception d'un projet d'éco-quartier, les technologies mises en place ne permettent pas d'assurer seules la viabilité du système. Deux enjeux importants déterminent le QZE : ***(1) la localisation*** (implantation et site géographique, topographie, caractéristiques naturels, etc.) et ***(2) la morphologie*** (forme urbaine, répartition des bâtiments, densité, etc.). D'après cette première approche, une conclusion importante est la valorisation des caractéristiques du terrain et l'analyse de divers paramètres du quartier afin d'approfondir à la réflexion sur l'implantation d'un futur quartier zéro énergie. La notion du **'smart ground'** (proposée par les auteurs) signifie qu'avant toutes les constructions ou réalisation technologiques, il faut choisir d'analyser et de faire un terrain d'un site 'intelligent' qui possède un potentiel pour accueillir un système zéro énergie.

Les résultats de cette approche, en considérant le quartier comme un système ouvert, ont fait ressortir la multitude d'interactions existantes entre les composantes d'un quartier. Afin de définir le contexte d'un quartier zéro énergie, l'approche systémique est proposée à la réalisation d'un diagramme des interactions en mettant en avant trois axes : (1) l'implantation du quartier, (2) les systèmes et (3) les besoins énergétiques. Le résultat de cette analyse a également défini trois leviers d'action pour la conception d'un quartier zéro énergie : (a) optimiser les besoins énergétiques, (b) utiliser l'hybridation énergétique et (c) organiser le stockage. La schématisation des étapes nécessaires pour la conception d'un quartier zéro énergie viable est présentée à la Fig. 9 :

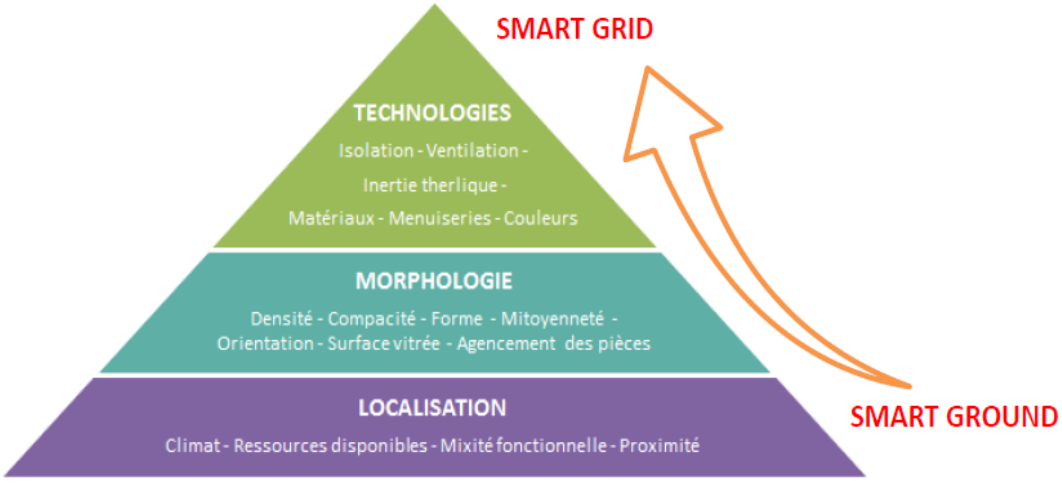


Figure 9 : *Schématisation des étapes nécessaires à la conception d'un quartier zéro énergie viable*

5. Futur travail

Le but de cette recherche est le développement d'un outil d'évaluation et de simulation d'un quartier sur la base d'une analyse multicritère et de la méthodologie utile de la conception à la réalisation d'un quartier autarcique en énergie. Dans un premier temps, l'étude analyse le contexte du quartier en utilisant critères qualitatives et quantitatives. Dans un second temps, l'étude va approfondir la méthode en pondérant les critères et définir les différentes typologies du quartier zéro énergie en fonction de trois leviers d'action.

Bibliographie

[AUB 08] AUBOUIN A., BRUNET-MORET C., DELORME L., GALIFER H., HODEBERT L., LADONNE F., PERE P., *Projets de Quartiers Urbains Durables En France: études de Cas, Enjeux et Tendances*., Formation Ingénierie et Architecture à Haute Qualité Environnementale, ENSAPLV, 2008

[WCED 87] WCED (World Commission on Environment and Development), *Rapport Brudtland, Notre avenir à tous*, 1987

[VAL 09] VALDIEU C., OUTREQUIN P., *L'urbanisme durable. Concevoir un écoquartier*, Paris, Editions Le Moniteur, 2009

[EU 10] EUROPEAN UNION, *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings*, Official Journal of the European Union, 2010, pp. 13-35

[GRU 12] GRUBLER A., BAI X., BUETTNER T., DHAKAL S., FISK D., ICHINOSE T., KEIRSTEAD J., SAMMER G., SATTERHWAITE D., SCHULZ N., SHAH N., STEINBERGER J., WEISZ H., *Global Energy Assessment. Towards a Sustainable Future*, UK and New York, Cambridge University Press, 2012

[ALL 15] ALLEGRINI J., OREHOUNIG K., MAVROMATIDIS G., RUESCH F., DORER V., EVINS R., «A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, nº52, 2015, p. 1391-1404

[EU 11] EUROPEAN UNION, *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, A roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*, Bruxelles, 2011

[CHE 05] CHERQUI F., Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier. Méthode Adequa, Thèse de doctorat, Université de la Rochelle Pôle Sciences et Technologie, 2005

[VAL 05] VALDIEU C., OUTREQUIN P., Des indicateurs de développement durable pour l'évaluation des projets de renouvellement urbain : le modèle INDI, 2005, SUSI-MAN : Environment and Sustainable Development Integration in Urban Plans and Management Projects

[RUE 14] RUELLE C, MARIQUE A.F., «La durabilité à l'échelle du quartier. Présentation du Référentiel Wallon Quartiers Durables » et des résultats des projets de recherches SUN et SOLEN», Université de Liège, Namur, 2014

[SAL 11] SALMON-YEPEZ G., Construction d'un outil d'évaluation environnementale des écoquartiers : vers une méthode systémique de mise en œuvre de la ville durable, Thèse de doctorat, Université Bordeaux, Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur, 2011

[MIN 14] MINISTERE DU LOGEMENT, DE L'EGALITE, DES TERRITOIRES ET DE LA RURALITE, *La démarche Eco-Quartier : une politique publique et des outils en faveur de la ville durable*, 2014

[SAH 08] SAHEB Y., Analyse critique des quartiers durables, rapport de recherche, 2008, EURL OPENEXP

[MAR 14] MARIQUE A.F., REITER S., «A simplified framework to assess the feasibility of Zero-Energy at the Neighborhod/Community scale», *Energy and Buildings*, vol. 82, 2014, p. 114-122

[SPW 10] SERVICE PUBLIC DE WALLONIE, Plan d'Action NZEB en vue de la transposition de l'Article 9 du recast de la Directive Européenne relative à la performance énergétique des bâtiments, rapport, 2010

[SAR 12] SARTORI I., NAPOLITANO A., VOSS K., «Net zero energy buildings: A consistent definition framework», *Energy and Buildings*, vol. 48, 2012, p. 220-232

[MAR 14] MARIQUE A.F., DE MEESTER T., CUVELLIER S., DE HERDE A., REITER S., SOLEN : Solutions for Low Energy Neighborhoods : L'objectif zéro énergie : un état de l'art, rapport de recherche, 2014, Université de Liège (LEMA), Université Catholique de Louvain (Architecture et climat)

[ERA 15] ERA CHAIR TEAM, Projet RE-SIZED (Research Excellence for Solutions and Implementation of net Zero Energy Districts), 2015, Université de Mons (UMONS)

[ADE 08] ADEME, ENERGY CITIES, Urbanisme – énergie : les éco-quartiers en Europe, 2008

[JAD 15] JADOUL V., «Des quartiers autonomes en énergie», *Imagine demain le monde n°107*, 2015

[TOL 16] TOLA A., «Hikari, le premier îlot urbain à énergie positive à Lyon», *UP Le mag : Inspirer le quotidien*, 2016

[DON 03] DONNADIEU G., DURANR D., NEEL D., NUNEZ E., SAINT-PAUL L., «L'Approche systémique : de quoi s'agit-il ? », *Synthèse des travaux du Groupe AFSCET " Diffusion de la pensée systémique"*, 2003

Localiser la population urbaine pour optimiser la gestion du territoire

Eric HALLOT[1], Lien POELMANS[2], Inge ULJEE[2], Benjamin BEAUMONT[1], Nathalie STEPHENNE[1]

[1]ISSeP, Institut Scientifique de Service Public, 200 rue du Chéra, 4000 Liège, Belgium – e.hallot@issep.be

[2] Environmental Modelling Unit, VITO, Mol, Belgium - lien.poelmans@vito.be

RÉSUMÉ

Construire les « Smart Cities » de demain est un enjeu de développement durable tant pour les pouvoirs publics régionaux que locaux. Pouvoir quantifier et localiser précisément la population est important pour la gestion des villes et l'analyse des risques (pollution, inondations, déchets…). Le projet SmartPop propose de désagréger les statistiques démographiques sur base de la carte d'occupation du sol wallonne (COSW). L'adaptation et la comparaison d'algorithmes de cartographie dassymétrique en Wallonie et en particulier à Liège sont présentées dans ce papier. La calibration et la validation des premiers résultats utilisent des données du Registre National des Personnes Physiques. La cartographie dassymétrique dépend fortement de la qualité et de la précision de la donnée ancillaire. Ce papier illustre l'influence de la rastérisation de cette donnée sur la qualité des résultats dans les centres urbains.

SUMMARY

Building the "smart cities" of tomorrow in the view of sustainable development is a challenging task for both regional and local authorities. Quantifying and localizing precisely the population is important for city's management and risk analysis (pollution, floods, waste…). The SmartPop project proposes a methodology for disaggregation of demographic statistics using the Walloon land use map (COSW). This paper addresses the implementation and comparison of existing dasymetric mapping algorithms for Wallonia with a focus on the city of Liège. Calibration and validation of the initial results use the dataset from the National Registry of Physical Persons. The accuracy of dasymetric mapping routines is highly dependent on the quality and precision of the ancillary input data. This paper illustrates the effect of rasterization of input data on the quality of the results in urban centers.

MOTS-CLÉS : Cartographie dassymétrique, densité de population, affectation du sol, COSW, Région wallonne, Liège.

KEY WORDS: Dasymetric mapping, population density, land cover, COSW, Walloon Region, Liège.

1. Introduction

Construire les « Smart Cities » (villes intelligentes) de demain est un enjeu de développement durable tant pour les pouvoirs publics régionaux que locaux. Quand la population se concentre dans l'espace restreint urbain, l'extension des surfaces imperméables (routes, bâtiments, parking…) augmente les risques d'ilots de chaleur (*urban heat island*), d'inondation, d'encombrement des déchets, de mobilité et de pollutions pour les citoyens urbains et pour l'ensemble du territoire. Selon l'analyse de risque (*modèle source-transfert-cible*), la population représente une cible mais sa concentration l'intègre également comme une source. L'analyse des risques nécessite donc des données géolocalisées de densité de population. Localiser précisément la population permet d'optimiser la gestion du territoire en optimisant l'utilisation de l'espace urbain, objectifs de la ville de Liège dans sa stratégie de « smartcity ».

Porté par l'ISSeP, le projet SmartPop[1] a pour but de développer des outils prédictifs d'analyse des risques sanitaires et environnementaux liés à l'urbanisation. Pour ce faire, il propose d'exploiter les nouvelles données

[1] http://www.issep.be/smartpop

disponibles en Région Wallonne (données satellitaires, Lidar[2]…). Ces données doivent améliorer les cartes d'occupation du sol en milieu urbain. Ces cartes seront ensuite utilisées dans la désagrégation des statistiques démographiques qui est envisagée actuellement sur base de la carte d'occupation du sol wallonne (COSW). Utilisation du sol et population seront également modélisées dans ce projet jusqu'à l'horizon 2050 afin de réfléchir à la stratégie spatiale d'une « smart city» [BEA 16].

Ce papier se concentre sur le développement d'un prototype de cartographie dassymétrique d'une part à l'échelle wallonne et d'autre part sur l'agglomération liégeoise. La calibration de l'algorithme et les premiers résultats sont discutés en fonction des commentaires du comité d'accompagnement du projet et des demandes des utilisateurs régionaux rassemblés au sein du groupe d'implémentation du projet.

2. Cartographie dassymétrique

La cartographie dassymétrique désagrège des données spatiales vers une unité d'analyse plus fine en utilisant des données complémentaires (ou « *ancillaire* ») pour affiner la localisation du phénomène [BAT 13]. Ce type de cartographie peut s'appliquer théoriquement à toute donnée spatiale quantitative agrégée par unité géographique administrative, environnementale… [MEN13]. Selon la technique de cartographie dassymétrique, des données ancillaires sont utilisées pour représenter géographiquement la variable quantitative mesurée à une résolution plus grossière [BAT 13]. La redistribution du nombre d'habitants/km² dans des zones spatiales homogènes améliore la précision et facilite l'analyse spatiale en éliminant les distorsions appelées «*modifiable areal unit problem*» (MAUP). En effet, les résultats de toute cartographie et de toute analyse cartographique spatiale dépendent de la définition des unités d'analyse. Le changement d'unités modifie le résultat comme l'illustre la figure 1 où les individus localisés intégrés dans trois types d'unités présentent une répartition spatiale différente.

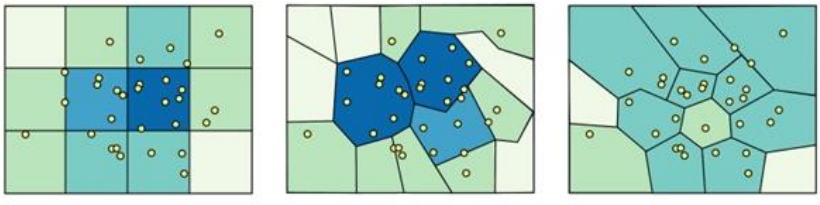


Figure 1. *"Modifiable Areal Unit Problem". La figure représente comment trois manières différentes d'agréger de données de comptage (par exemple, trois unités de recensement différentes) peuvent affecter l'apparence d'une carte choroplèthe (valeur/surface). Les trois cartes utilisent la même légende de couleurs et de classification (modifié d'après [GRU14]).*

Les cartes de densité mondiales comme Landscan [DOB 00], Gridded Population of the World [BLK 06] et WorldPop [LIN 12] redistribuent les statistiques démographiques sur une maille régulière, une grille ou un raster. A l'échelle européenne, les données Eurostat de 2001 ont été désagrégées par dassymétrie en fonction des classes d'occupation du sol de Corine Land Cover - CLC - [GAL 01]. Aucune mise à jour de cette carte en fonction de la nouvelle CLC 2012 et de statistiques démographiques plus récentes n'a encore été produite. L'institut national des statistiques propose une carte à 1 km² de résolution basée sur le Census 2011 [INS 11].En Flandre, l'algorithme de Gallego [GAL 01] a été adapté pour produire la carte de 2010 [ENG 11]. Le projet SmartPop propose d'adapter l'algorithme existant à la Wallonie avec comme objectifs d'obtenir une carte de meilleure résolution, une procédure plus transparente (plus de contrôles sur les inputs et les outputs) une mise à jour à la demande dès l'obtention des données de base validées par les responsables régionaux.

3. Méthodologie

Cette section décrit la méthode de cartographie dassymétrique envisagée en décrivant d'abord les données de population et d'occupation du sol qui existent en Wallonie.

[2] LIght Detection And Ranging

3.1 Données existantes

3.1.1 Unités de recensements

Les données de population sont quantifiées selon les unités statistiques nationales. La division administrative belge datant de 1796 repose sur quatre unités territoriales : les régions, les provinces, les arrondissements administratifs et les communes. Depuis, 1970, le secteur statistique est l'unité territoriale de base. Ce découpage a été créé à l'occasion du Recensement Général de la Population et des Logements de 1970 afin d'obtenir une vision détaillée des réalités socio-économiques des communes et d'obtenir une précision accrue sur la morphologie et les caractéristiques de l'habitat [VDH 72]. Le découpage a été remodelé en 1981 sur base de caractéristiques structurelles d'ordre social, économique, urbanistique ou morphologique et retouché pour l'Enquête socio-économique de 2001 afin d'épouser les modifications des limites communales et afin d'intégrer les grandes modifications de l'utilisation du sol. La taille de ces secteurs est variable de 1 à 6000 ha. C'est à ce niveau que les données de population les plus précises sont fournies [INS 11]. Pour la Région wallonne, les limites administratives sont emboitées de la manière suivante : 1 région, 5 provinces, 20 arrondissements, 262 communes et 9875 secteurs statistiques.

3.1.2 Données de population INS

Seize recensements généraux de la population et des logements ont été réalisés entre 1846 et 2011. Le recensement n'était pas uniquement un comptage de la population mais revêtait un aspect administratif important en déterminant le chiffre officiel de la population de chaque commune qui permet, entre-autres, de calculer l'attribution des subsides, la rémunération des fonctionnaires communaux, le nombre de membres du conseil communal et du conseil provincial…

L'introduction du Registre National des Personnes Physiques dans les années 1980 a nettement facilité le comptage de la population et les chiffres de la population ont pu être publiés beaucoup plus vite. Le recensement général a de ce fait perdu son caractère administratif. A partir de 2001, la population n'est désormais plus comptée par le « recensement » mais bien via le registre national.

3.1.3 Registre national des personnes physiques (RNPP 2013)

Le registre national désigne le système de traitement d'informations qui assure l'enregistrement, la mémorisation et la communication d'informations relatives à l'identification des personnes physiques c'est-à-dire les citoyens. Le registre national assure le partage des données authentiques d'identification des personnes physiques (belges et étrangers, réfugiés compris résidants en Belgique) [IBZ 14].

Dans le cadre de cette recherche, nous avons reçu cette information pour l'année 2013 sous la forme d'un fichier raster (100 x 100 m de résolution) de l'IWEPS (Institut Wallon pour l'Evaluation et la Prospective Statistique). Ce raster a été réalisé à partir des lieux de résidence des personnes sous la forme de leur adresse postale. Cette dernière a été transformée en coordonnées XY Lambert Belge 1972 par le SPF Finances/AGDP qui fait le lien avec les adresses reprises à la matrice cadastrale. La coordonnée correspond majoritairement au centre du bâtiment de la parcelle dont l'emprise au sol est la plus grande. Chaque individu est localisé sur le territoire par un point. La rastérisation se fait en utilisant un outil de conversion de points vers un mode image où on assigne à la valeur de cellule le nombre de points tombant dans la cellule. Sujet à la loi sur la protection de la vie privée, la donnée est anonymisée et la valeur des pixels de 1 à 4 habitants a été portée à 5 habitants.

3.1.4 Carte d'occupation du sol (COSW 2007)

La Carte d'Occupation des Sols de Wallonie (COSW) date de 2007 mais intègre l'information de différentes sources de 2005 [BAL 07]. L'intégration de toutes les données existantes dans une légende alliant l'occupation et l'utilisation des sols s'inspirait de la carte européenne (CORINE Land Cover). La COSW se base principalement sur le Plan de Localisation Informatique (PLI) et associe d'autres thématiques par géotraitements effectués à l'échelle des entités surfaciques. L'application d'une typologie permet ensuite de classer et d'agréger ces entités surfaciques (polygones) dans les différentes classes d'occupation dans la légende.

Elle est utilisée par de nombreux services mais une mise à jour de ce produit n'a pu être réalisée et est discutée par ailleurs au sein du projet. Cette donnée va servir de base à la réflexion sur la cartographie dassymétrique. La légende présente 5 thématiques hiérarchisées sur 5 niveaux.

3.2 Cartographie dassymétrique

L'utilisation du logiciel développé par notre partenaire flamand permet de consolider la cartographie de la population à l'échelle nationale. Le module de cartographie dassymétrique du logiciel WEISS, développé par le VMM et le VITO[3], exploite les données ancillaires à deux niveaux d'échelle. L'intégration d'information plus précise sur les zones résidentielles renforce en effet la qualité de la désagrégation [VES 09]. La distribution dassymétrique de la population est réalisée au travers des classes LU/LC (Land Use / Land Cover) en fonction de leurs poids relatifs, en terme de densité de population, définis par l'utilisateur [POE 15].

Il existe d'autres algorithmes qui sont évalués dans leurs avantages et inconvénients par rapport au WEISS en particulier le modèle « *Random Forest* » [STV 15] ou la toolbox sous ArcGIS10 (©ESRI) développée par l'USGS[4]. La procédure automatique du logiciel de l'USGS est basée sur des densités relatives calculées avec un « pourcentage de recouvrement spécifique » des zones LU/LC par les unités de population qui égalent ou dépassent un seuil défini par l'utilisateur (figure 2) [MEN 06] [SLE 07]. Ce seuil fixe ne permet donc pas de calibrer l'algorithme avec des données spécifiques.

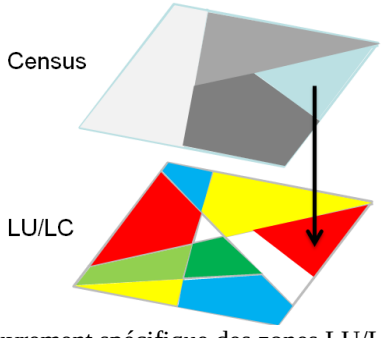


Figure 2. Pourcentage de recouvrement spécifique des zones LU/LC par les unités de population (census).

3.3 Calibration

Deux paramètres doivent être définis à priori :

a. L'identification des classes de la COSW qui sont considérées comme « *non urbaines* » où il est possible de trouver des habitations (champs, forêts, centres scolaires…) et « *inhabitées* » (chemin de fer, routes, lacs…) où il est exclu de trouver des habitants;

b. les densités de population relatives des classes « *habitées* »

Pour ce faire, les différentes classes de la COSW ont été croisées avec les données raster du RNPP 2013 par statistiques zonales en considérant les cellules nulles et sans données (*nodata*) comme zones sans habitant. En fonction de ces résultats, nous avons reclassé la légende de la COSW en 5 catégories : les 3 zones d'habitat de haute densité, densité moyenne et faible densité de population, les zones d'habitat possible (non urbaines) et les zones inhabitées (densité de population nulle ou quasi nulle). Cette analyse nous a également permis de calculer les valeurs de densités moyennes de population de chacune des classes à l'échelle de la Région wallonne et d'en déduire leur poids relatifs (0.6 – 0.25 – 0.12 – 0.03 – 0).

Les données du RNPP sont ici utilisées de manière binaire (absence / présence de population) et de manière relative (densité forte / faible). Les valeurs absolues de la cartographie raster du RNPP nous permettent par ailleurs de valider les résultats. Dans la suite du projet, des données vectorielles seront utilisées pour cette validation à l'échelle de la ville.

4. Résultats

La cartographie dassymétrique a été réalisée à deux échelles, la première au niveau de la Région wallonne et la seconde au niveau des 9 communes de l'agglomération liégeoise (Ans, Beyne-Heusay, Chaudfontaine, Flemalle, Grâce-Hollogne, Herstal, Liège, Saint-Nicolas, Seraing).

[3] VMM : Vlaams Milieu Maatschappij - VITO : Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek - http://weiss.vmm.be

[4] USGS : United States Geological Survey

A l'échelle de la région, les données de population de 2013 sont agrégées au niveau des 20 arrondissements (figure 3a). La désagrégation se base sur les données ancillaires de la COSW (2007). Cette base de données est d'abord rastérisée à 100 mètres de résolution et ensuite reclassée en 5 classes de densités de population relatives avant de répartir les données de populations par secteurs dans chaque classe de densité (cf. § 3.3). Les résultats de cette carte dassymétrique sont comparés aux données du RNPP 2013. L'erreur moyenne est de -1 habitant /ha avec un écart-type de 54 habitants/ha mais avec des valeurs extrêmes allant de -540 à 5122 habitants/ha. Le mode est de 5 habitants/ha correspondant à la valeur minimale du RNPP 2013 dû à l'anonymisation des données (cf. § 3.1.3). Ces erreurs peuvent, en partie, être expliquées par l'écart temporel entre les données de population (2013) et les données ancillaires (2007). En effet, les zones d'extension récentes de l'habitat ne sont pas prises en compte. De plus, nous avons remarqué que les valeurs des classes de population élevées variait fortement entre les différents arrondissements, pouvant aller du simple au triple entre les arrondissements plus ruraux (Marche, Virton, Neufchâteau) aux arrondissements les plus urbanisés du Nord et l'Est de la Wallonie (Liège, Verviers, Namur, Huy). Une cartographie à l'échelle des arrondissements qui utilisera leur poids relatifs respectifs est prévue dans la suite du projet.

Sur la zone de liège, la même procédure de désagrégation est réalisée avec les données de population de 2013 agrégées au niveau des 560 secteurs statistiques (figures 3b et 4a) composant les 9 communes. Les résultats ont également été comparés aux données du RNPP 2013 (figure 4b). L'erreur moyenne de 2.7 habitants/ha avec un écart type de 77 habitants/ha, des valeurs extrêmes comprises entre -546 et 1680 habitants/ha et un mode à 5 habitants/ha pour les mêmes raisons que précédemment.

La figure 4c montre le résultat en quatre classes (habitat dense / eau / non habité / autres) de la rastérisation à 100 mètres pour le centre-ville de Liège. On observe à la figure 4e que la qualité de la carte de densité est directement liée à la précision des données ancillaires, y compris leur mode de rastérisation, avec la présence de « pixels habités » au niveau des voies d'eau ou du réseau routier. La distribution des densités n'est pas homogène. Plusieurs quartiers affichent une densité de population nulle, tandis que les autres sont représentés avec quelques pixels de densité moyenne et une majorité de pixels de très forte densité. Il apparaît que ces zones à haute densité correspondent à des secteurs statistiques ou des délimitations LU/LC très petits. Dans cet environnement, une résolution de désagrégation trop importante, ici 100 m, conduit à des résultats aberrants avec, par exemple, l'ensemble de la population d'un seul secteur statistique concentrée sur un ou deux pixels.

Pour les quartiers densément urbanisés une résolution inférieure à 100 mètres est donc indispensable. La figure 4d est le résultat, avec les mêmes classes, de la rastérisation à 10 mètres puis ré-aggrégé à 50 mètres à l'aide du logiciel SpatAggr [RIK 05] qui force la conservation des surfaces totales de chacune des classes. La figure 4f montre la cartographie dassymétrique avec les mêmes données de population et les données ancillaires à 50 mètres de résolution. La distribution des densités est plus homogène et la répartition des classes « habitées » vs « non-habitées » est mieux respectée.

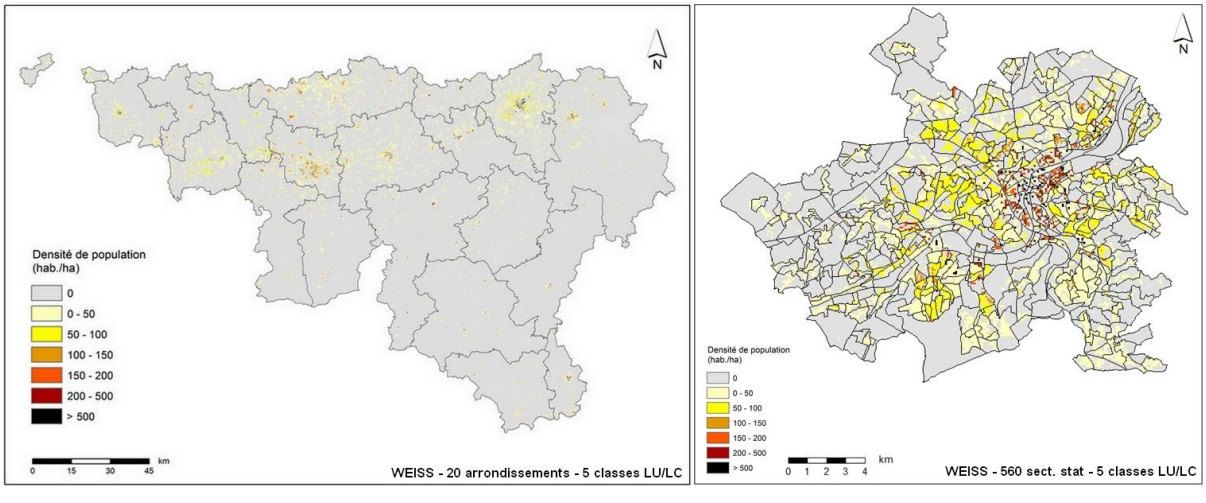


Figure 3. *Cartes de densité de population réalisées avec le logiciel WEISS. A gauche, la Région wallonne sur base de 20 arrondissements et à droite, les neuf communes de l'agglomération liégeoises sur base de 560 secteurs statistiques.*

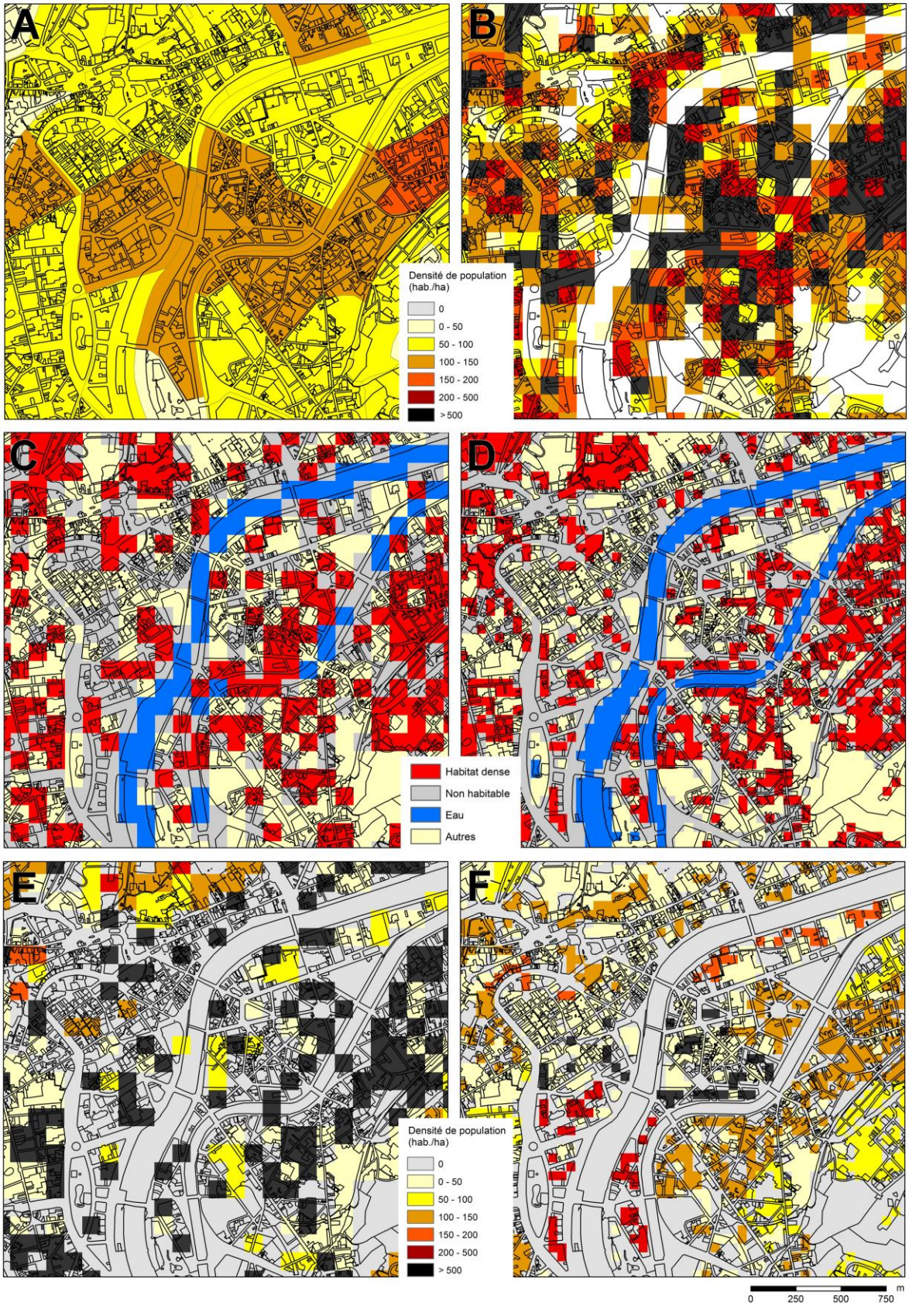


Figure 4. *Centre-ville de Liège. Fond de plan COSW (2007) - A) densité de population représentée au niveau des secteurs statistiques - B) densité de population selon le RNPP13 - C) rastérisation de la COSW à 100 x 100 m - D) rastérisation de la COSW à 50 x 50 m (VITO - SpatAggr) - E) carte dassymétrique population de 2013 à 100 x 100 m - F) carte dassymétrique de la population de 2013 à 50 x 50 m.*

5. Conclusions et perspectives

La cartographie dassymétrique est un outil puissant pour obtenir des données géolocalisées de densité de population. A l'échelle de la Wallonie, il n'existe aucun prototype dassymétrique spécifique et le projet SmartPop propose de développer un algorithme permettant de produire cette carte à la fréquence voulue par les utilisateurs. Ces cartes doivent améliorer non seulement l'analyse des risques en Wallonie mais également la comparaison avec les cartes produites en Flandre, en se référant au même modèle. Les premiers résultats démontrent la pertinence des résultats dassymétriques par une comparaison avec les données rasterisées du RNPP. Des développements ultérieurs sont néanmoins nécessaires pour discuter de la pertinence d'utiliser des données de 2013 (RNPP) pour calibrer une cartographie dassymétrique utilisant les données LU/LC de 2007 (COSW). De même, l'obtention et l'utilisation des données RNPP au format original (points) permettra de calibrer et de valider les cartes à toutes les échelles.

Par rapport à la carte du RNPP, le développement d'un algorithme de dassymétrie offre la possibilité de fournir ces données de manière régulière et avec des échelles plus précises sur certaines zones, si nécessaire. L'outil utilisé par le Vito a été préféré à d'autres méthodes pour sa robustesse et sa modularité. Cependant, la comparaison avec d'autres logiciels est utile d'un point de vue scientifique et permettra éventuellement de donner des perspectives d'amélioration de l'outil WEISS avec, par exemple, la possibilité de prendre en compte des poids relatifs différents en fonction de zones déterminées.

L'intégration des nouvelles cartes de densité dans les analyses de risque et l'analyse de leur valeur ajoutée dans l'évaluation de ce risque sera réalisée dans la suite du projet SmartPop. La présentation des premiers résultats lors du comité d'évaluation a été très positive, la diffusion de ceux-ci au sein du groupe d'implémentation sera réalisée dans les prochains mois afin de permettre une appropriation des résultats pour les utilisateurs au sein du projet et un suivi de l'implémentation par des formations si nécessaire.

La technique dassymétrique nécessite une donnée ancillaire la plus précise et la plus à jour possible. Pour la cartographie de la population, la désagrégation se base sur une carte d'occupation du sol. La carte d'occupation du sol européenne, CLC, produite par les Etats Membres à l'aide de données satellitaires nécessite un processus de validation long et une lenteur de diffusion de ces données. La cartographie dassymétrique européenne de 2006 utilisant des données de population de 2001 est actuellement encore utilisée en input des modèles de risque sanitaire et environnemental. En Wallonie, la COSW 2007, inspirée de la légende CLC, a intégré plusieurs bases de données vectorielles existantes mais n'a pas été mise à jour depuis. La recherche présentée dans ce papier se base sur cette carte tout en connaissant les inconvénients. La réflexion sur la mise à jour de cette dernière est primordiale et fait partie du projet SmartPop.

La qualité de la carte de densité de population est en effet fortement dépendante de la qualité de la carte d'occupation du sol utilisée. Selon [BAT 13], améliorer la qualité des données d'occupation des sols pour les classes urbaines augmente notablement la qualité de la carte finale. Les zones urbaines changeant rapidement, les données satellitaires et aériennes comme le LIDAR, les photographies aériennes, et les données GSM acquises régulièrement ou d'autres données, comme les données cadastrales, permettent de mettre à jour les cartes d'occupation du sol [PAT 13]. La Wallonie a un plan d'acquisition annuel de photos aériennes et deux couvertures LIDAR et Pléiades acquises en 2013. Pour actualiser les informations spatiales sur les zones urbanisées, SmartPop propose de développer une classification orientée-objet en utilisant des données aériennes ou satellitaires et des informations sur la hauteur et la fonction des bâtiments [VDK 14].

Une autre solution pour obtenir une carte d'occupation du sol plus récente est de la modéliser. La modélisation de l'occupation et de l'utilisation du sol a évolué d'une approche qualitative à une approche quantitative ; celle-ci fut d'abord empirique et statistique puis mécaniste, systémique et dynamique en prenant en compte les facteurs de changement [STE 02]. Les modèles d'automates cellulaires ont démontré leur efficacité pour la simulation dynamique à très haute résolution spatiale [WHI 12]. A l'échelle de l'Europe, et appliqué en Flandre, le modèle Moland utilise la technique des automates cellulaires pour prédire la répartition de l'utilisation des sols dans le temps sur base de règles de transitions répondant à des changements d'activité à l'échelle d'une grille spatiale de 1ha [LAV 04]. Le projet SmartPop utilse également cette technique en collaboration avec le VITO pour simuler l'évolution de l'utilisation du sol et donc obtenir une estimation des changements de distribution de population jusqu'à l'horizon 2050. Mais ce papier se limite à l'utilisation de la carte actuelle, la COSW.

6. Bibliographie

[BAL 07] BALTUS C., LEJEUNE P. & FELTZ C, 2007. Mise en œuvre du projet de cartographie numérique de l'Occupation du Sol en Wallonie (PCNOSW), Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.

[BAT 13] BATISTA SILVA F., GALLEGO J.& LAVALLE C., 2013. A high-resolution population grid map, *Journal of Maps*, 9, 16-28.

[BEA 16] BEAUMONT B., STEPHENNE N., HALLOT E., POELMANS L. & CLOSE O., 2016. A common land-use change model for both the Walloon and Flanders regions in Belgium. GEOProcessing 2016 (Venice, Italy, 24-28/04/2016) (Accepted).

[BLK 06] BALK D.L., DEICHMANN U., YETMAN G., POZZI F., HAY S.I. & NELSON A., 2006. Determining Global Population Distribution, Methods, Applications and Data Advances in Parasitology, 62, 119-156.

[DOB 00] DOBSON J. E., BRIGHT E. A., COLEMAN P. R., DURFEE R. C. & WORLEY B. A., 2000. Landscan: A Global Population Database for Estimating Populations at Risk, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66, 849-857.

[ENG 11] ENGELEN G., VAN ESCH L., ULJEE I., DE KOK J., POELMANS L., GOBIN A. & VAN DER KWAST H., 2011. RuimteModel: Ruimtelijk-dynamisch landgebruiksmodel voor Vlaanderen. Steunpunt Ruimte en Wonen, 2011/RMA/R/242.

[GAL 01] GALLEGO F. J., & PEEDELL S. 2001. Using Corine Land Cover to map population density. In European Environment Agency. "Towards agri-environmental indicators: Integrating statistical and administrative data with land cover information". Copenhagen, 94-105.

[GRU14] GRUVER A., 2014. Cartography and Visualization. Online Geospatial Education Program Office, Department on Geography of the Pennsylvania State University, http://www.geog.psu.edu, GEOG 486.

[IBZ 14] IBZ, 2014. SPF Intérieur - Direction générale Institutions et Population, http://www.ibz.rrn.fgov.be/fr.

[INS 11] INS, 2011. Census 2011, Service Public Fédéral Economie, http://statbel.fgov.be/fr/statistiques/collecte_donnees/recensement/Census2011.

[LAV 04] LAVALLE C., BARREDO J. I., MCCORMICK N., ENGELEN G., WHITE R., & ULJEE I., 2004. The MOLAND model for urban and regional growth forecast. A tool for the definition of sustainable development paths. Italy: Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission.

[LIN 12] LINARD C., & TATEM A. J., 2012. Large-scale spatial population databases in infectious disease research. *Int Journal of Health Geogr*, 11(7).[MEN 06] MENNIS J., & HULTGREN T. 2006. Intelligent Dasymetric Mapping and Its Application to Areal Interpolation, 33(3), 179-194.

[MEN 13] MENNIS J., 2013. Generating surface models of population using dasymetric mapping. *The Professional Geographer*, n°55, vol. 1, 31-42.

[MEN 06] MENNIS, J., & HULTGREN, T. 2006. Intelligent Dasymetric Mapping and Its Application to Areal Interpolation, 33(3), 179-194.

[PAT 13] PATINO J.E. & DUQUE J.C., 2013. A review of regional science applications of satellite remote sensingin urban settings Computers, *Environment and Urban Systems*, 37, 1-17.

[POE 15] POELMANS L., WHITE R., ENGELEN G. & ULJEE I., 2015. Modeling in Support of Spatial Planning and Policy Making: The example of Flanders, chap. 11, *in Modeling Cities and Regions as Complex Systems*, WHITE, R. ET AL. EDS., The MIT Press, 330 p.

[RIK 05] VAN DER MEULEN M. & HURKENS J., 2005. SpatAggr: Consistente aggregatie over meerdere jaren, Eindrapport, Research Instituut voor Kennis Systemen, 14 p.

[SLE 07] SLEETER R. & GOULD M., 2007. Geographic information system software to remodel population data using dasymetric mapping methods: U.S. Geological Survey Tech. and Methods, 11-C2, 15 p.

[STE 02] STEPHENNE N., 2002. *Un modèle dynamique de simulation pour comprendre le processus de changement d'utilisation du sol dans la région soudano-sahéliene*. Brussel: Koninklijke academie voor overzeese wetenschappen, 146 p.

[STV 15] STEVENS F.R., GAUGHAN A.E., LINARD C. & TATEM A.J., 2015. Disaggregating census data for population mapping using random forests with remotely-sensed and ancillary data, *PLoS ONE* 10(2): e0107042. doi:10.1371/journal.pone.0107042.

[VDH 72] VAN DER HAEGEN TH. & BRULARD H., 1972. Small area statistics and their use for social geographical and planological research, ed. by TH. BRULARD AND H. VAN DER HAEGEN, *Acta Geographica Lovaniensia*, 448 p.

[VDK 14] VAN DE KERCHOVE R., KASZTA Z. & WOLFF E., 2014. A comparison of pixel-based and object-based image analysis with selected machine learning algorithms for the classification of a savanna landscape using WorldView-2 imagery, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.*

[VES 09] VAN ESCH L., ENGELEN G., GOBIN A. & ULJEE I., 2010. Landgebruikskaart Vlaanderen en Brussel, Intern rapport 2010/RMA/R/158, Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek.

[WHI 12] WHITE R., ULJEE I., & ENGELEN G., 2012. Integrated modelling of population, employment, and land use change with a multiple activity based variable grid cellular automaton. *International Journal of Geographic Information System*, 26, 1251-1280.

La mixité fonctionnelle participe-t-elle à l'intégration urbaine des infrastructures aériennes de transport ?

Gabrielle Richard[1], Vincent Becue[2], Bruno Barroca[3], Joël Idt[4], Pierre-Etienne Gautier[5]

[1] *Université de Mons, Faculté d'Architecture et d'Urbanisme, 88 rue d'Havré, 7000 Mons Belgique / SYSTRA, 72 rue Henry Farman, 75015 Paris France, grichard@systra.com*

[2] *Université de Mons, Faculté d'Architecture et d'Urbanisme, 88 rue d'Havré, 7000 Mons, Belgique, Vincent.BECUE@umons.ac.be*

[3] *Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Lab'Urba, Département génie urbain, 6-8 av. Blaise-Pascal Cité Descartes Champs-sur-Marne 77455 Marne-la-Vallée cedex 2 France, Bruno.Barroca@u-pem.fr*

[4] *Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Lab'Urba, Département génie urbain, 6-8 av. Blaise-Pascal Cité Descartes Champs-sur-Marne 77455 Marne-la-Vallée cedex 2 France, joel.idt@u-pem.fr*

[5] *SYSTRA, Direction de l'Innovation, 72 rue Henry Farman 75015 Paris, France, pegautier@systra.com*

RÉSUMÉ. On conçoit aujourd'hui de nombreux réseaux de transport sur des infrastructures de type aériennes. Rapides à mettre en œuvre, moins couteuses que la percée de tunnels, elles permettent de développer des réseaux de transport rapidement et à moindre frais. Cependant, ces infrastructures engendrent des impacts importants sur l'espace urbain. Sources de nuisances (bruit, vibrations et les ombres portées), elles contribuent à la dégradation de l'environnement proche et créent de véritables coupures dans les territoires. Notre recherche envisage l'utilisation des espaces résiduels de l'infrastructure comme un potentiel à investir pour permettre une meilleure intégration de ces ouvrages dans le système urbain. Dans cette publication seront étudiés deux exemples de réalisation en France et en Norvège qui développent une intégration basée sur la mixité fonctionnelle.

ABSTRACT. Many elevated transport infrastructures are built around the world. Quick to build and cheaper than the excavation of tunnels, this structures are very helpful nowadays to quickly develop new transport networks. But while this viaducts facilitates the rapid transit needed to develop towns, they are also synonymous with disturbances to residents (noise, vibrations, shadows), and the creation of barriers in increasingly dense urban environments. So efforts must now be made to limit its detrimental impact on the continuity of use, and to create structures that reconcile the constraints of the transport system with the needs of the urban system. The purpose of this publication is to consider the use of residual spaces beneath viaducts to merge them into the built-up environment. We study the principle of mixed-uses development or functional diversity and looking through two examples in France and Norway.

MOTS-CLÉS : infrastructure aérienne de transport, intégration urbaine, mixité fonctionnelle, multifonctionnalité.

KEY WORDS: elevated transport infrastructures, urban integration, mixed-used development, multifunctionality.

1. Introduction

Les infrastructures de transport facilitent les déplacements nécessaires au développement des villes. C'est notamment le cas des infrastructures de transport guidé (métro, train, …). Elles s'inscrivent parfaitement dans les politiques actuelles d'aménagement qui cherchent à renforcer la prise en compte des enjeux environnementaux et de mobilité. Il semblerait que pour des territoires urbains en développement, l'implantation de ces systèmes de transport sur des infrastructures aériennes offre bien des avantages en termes de maitrise des coûts, de maitrise de la difficulté technique, de gestion patrimoniale et d'impact environnementaux. Mais parallèlement à ces aspects positifs, ces ouvrages créent des nuisances pour les populations riveraines et agissent comme des fractures pour les tissus urbains traversés. Il convient donc d'anticiper leurs impacts sur les continuités d'usage et d'envisager des modes de conception conciliant les contraintes du système de transport et les besoins du système urbain environnant.

Positionné en hauteur, le système s'isole des contraintes de l'espace urbain pour augmenter sa propre efficience et libérer l'espace au sol. Hors des points de transition que constituent les gares/stations, ces ouvrages aériens sont envisagés et conçus comme des éléments isolés du système urbain et ne proposent que des impacts négatifs aux territoires et dégradent la qualité de vie à leurs abords.

Dans cette communication, l'infrastructure de transport aérienne est envisagée comme un potentiel pour les espaces urbains. Pour cela, nous partons de l'hypothèse suivante : la planification simultanée des espaces en sous-face des viaducs, leur utilisation organisée ou spontanée pour d'autres usages permet d'y d'intégrer des programmes urbains adaptés au contexte et ainsi générer des impacts positifs de l'infrastructure aérienne dans l'environnement bâti traversé. Les fonctions ainsi superposées transforment l'emprise monofonctionnelle en emprise multifonctionnelle et participent alors à l'attractivité du lieu.

Basée sur la pluralité des fonctions pour rétablir les continuités d'usages, la mixité urbaine apparaît porteuse de solutions vis-à-vis des problématiques environnementales actuelles et est redevenue, depuis une trentaine d'année, un principe fondamental du développement urbain. Cependant ce principe ne s'applique pas ou très rarement aux infrastructures. Nous souhaitons donc interroger ce principe de mixité fonctionnelle appliqué à la fonction transport et envisager en quoi l'ouvrage aérien peut jouer le rôle d'interface entre le système de transport et le système urbain.

Une présentation concise des évolutions des cadres théoriques en urbanisme ayant mené aux relations conflictuelles que l'on connaît aujourd'hui entre systèmes de transport de surface et systèmes urbains sera suivie par la caractérisation du concept de mixité en urbanisme à travers ses échelles d'application et ses objets. La mixité sera envisagée par la suite sur les espaces dédiés à la fonction transport. Enfin deux aménagements d'espaces résiduels d'infrastructures aériennes de transport seront analysés : Les Arches à Issy-les-Moulineaux en France et le Bruparken à Drammen en Norvège.

2. Cohabitation et dualité entre l'infrastructure aérienne de transport et l'espace urbain

La cohabitation entre infrastructure de transport et espace urbain est complexe. Pour le système de transport, l'espace bâti est source de nombreuses contraintes : croisements, changements de direction, dénivelé, autant de conflits d'usages qui ne permettent pas de garantir l'efficience du système de transport rapide. Pour l'espace urbain et la population riveraine, l'infrastructure est synonyme de nuisances (bruit, vibrations, pollution atmosphérique et visuelle). Et malgré sa fonction de connexion territoriale, elle tient lieu, dans son environnement immédiat, de frontière tant physique (dégradation des déplacements à son abord) que psychologique (dégradation des espaces résiduels, sentiment d'insécurité à son abord, etc…) [HER 11]. Cette fragmentation de l'espace se traduit aussi socialement et c'est ce que Luis Santos y Ganges appelle "l'effet frontière" [SAN 11] : les populations de part et d'autre de l'infrastructure de transport sont mises à distance ce qui condamne les relations de voisinage et entrave les continuités d'usages. Selon lui, les barrières ainsi constituées sont même devenues des "références pour les opérations immobilières, la planification et la gestion urbaine". Les traversées du linéaire d'infrastructure sont souvent limitées et complexes, ce qui mène parfois à des phénomènes de ségrégation et d'enclavement de certains quartiers [ANC 14]. Les infrastructures de transport impactent également les paysages et induisent des problématiques environnementales liées notamment aux écoulements des eaux et à la biodiversité. Une telle fracture, quel que soit le territoire, ne peut donc être minimisée. Aujourd'hui, la ville et le transport de masse cohabitent mais ne communiquent pas, chacun étant pour l'autre une contrainte comme une nécessité.

Cette dualité s'explique en partie par la caractéristique "hermétique" du transport et ses conditions de fonctionnement. Ainsi, les premières infrastructures aériennes de transport sont conçues au XIXème siècle pour accompagner le développement du transport ferroviaire dont le système ne peut s'adapter aux contraintes de l'espace urbain [ALO 13]. C'est ensuite le développement de l'automobile, dès les années 60 en parallèle des théories fonctionnalistes de l'urbanisme moderne, qui va définitivement marquer la relation ville-infrastructure. La Chartes d'Athènes de 1933, pose les bases de cette pensée qui définit l'espace urbain comme une juxtaposition de zones dédiées à des usages spécifiques : habiter, travailler, se divertir et circuler. C'est ce que Le Corbusier appelle "le zonage" et définit comme le fait "d'attribuer à chaque fonction […] sa juste place" [LEC 57]. Dès lors, le transport n'est plus envisagé que dans une approche fonctionnaliste consistant à relier les trois autres fonctions entre elles. C'est ainsi que de nombreuses infrastructures routières sont conçues sur viaducs, pensées comme des réseaux techniques, à partir de la seule logique circulatoire et ignorant les territoires traversés. "L'espace urbain est ignoré" [LEV 85].

Outre les impacts sur l'espace urbain, cette pensée fonctionnaliste du transport a aussi mené à une distinction nette des professions agissant sur la ville. Les ingénieurs se sont emparés de la conception des infrastructures de transport et les urbanistes ont "composé avec ce que ces derniers proposaient" [BAU 12]. Cette distinction est toujours très forte aujourd'hui et la pratique de l'ingénierie du transport reste très fonctionnaliste. Basée sur des commandes énoncées en termes quantitatifs (nombre de voyageurs, rapidité des déplacements), elle se préoccupe peu de l'impact d'un tracé sur la viabilité sensible des espaces traversés. Ainsi les infrastructures aériennes de transport, conçues en silo et de manière déterritorialisée, continuent aujourd'hui encore de fragmenter les espaces urbains.

On peut cependant noter que depuis une trentaine d'années les projets de tramway "à la française" [KAM 14] modifient le rapport entre la ville et ses transports. La commande a évolué vers des opérations de transport intégrées dans l'espace public, articulés à des opérations de requalification ou de développements urbains. Ces projets ont fait émerger de nouvelles méthodes de travail avec au cœur du processus la collaboration entre décideurs, acteurs du transport, industriels et concepteurs (designers, urbanistes…) autour d'un projet commun. Comment cette pensée intégrée transport-urbanisme, qui a émergé avec le tramway, peut-elle se développer à l'échelle des infrastructures aériennes de transport tous systèmes confondus (métro, grandes lignes, autoroutes, etc….) ?

3. Le concept de mixité fonctionnelle

3.1. Le concept de mixité fonctionnelle en urbanisme

Aujourd'hui, les principes du développement durable sont mis en œuvre dans les projets d'urbanisme et la densité fait partie des solutions évoquées pour contrer, entre autres, l'étalement urbain et les déplacements automobiles associés [BOU 11]. La notion de densité s'oppose alors à l'"urbanisme dispendieux"[1] [MAR 12] par l'idée d'une optimisation de l'usage du sol. Cependant, s'il est généralement admis que la densité est nécessaire, elle n'en est pas moins connotée très négativement car elle ne garantit pas à elle seule la qualité de l'espace urbain [DAC 09].

Le concept de « mixité fonctionnelle» est né en urbanisme dans les années 90. Adossé à la problématique de densité, il s'oppose au découpage du territoire par zones monofonctionnelles qui a, comme on l'a vu précédemment, caractérisé la planification urbaine de l'après-guerre. En tant qu' "antidote" au zonage [BEC 04], le concept de mixité urbaine désigne la répartition équilibrée à l'intérieur d'un périmètre, des différentes fonctions urbaines en tenant compte des facteurs sociaux et économiques. Ce mélange des fonctions induit diverses externalités positives telles que l'optimisation des espaces, des services et équipements, des possibilités de rencontres et de synergies [PUC 13].

Jacques Lucan distingue deux types de mixité fonctionnelle qui peuvent s'envisager à l'échelle du quartier, de l'ilot comme du bâtiment [LUC 12] : la mixité "verticale" ou "horizontale", selon que les usages sont organisés les uns à côté des autres ou en superposition. Il précise également que cette mixité fonctionnelle s'accompagne d'une mixité sociale (typologie des logements, mode d'accession) et d'une mixité morphologique qui caractérise les formes bâties et l' "hétérogénéité des constructions".

Il n'existe cependant pas réellement de définition unanimement reconnue de la mixité fonctionnelle. L'Urban Land Institute (ULI) donne la définition suivante du "mixed-used development" :

[1] « La ville étalée génère notamment des surconsommations multiples, tant en termes d'espaces et de temps que d'énergie. » [MAR 12]

- L'association de trois fonctions a minima, qui produisent des revenus significatifs

- Une intégration physique et fonctionnelle des différentes composantes du projet incluant des connections piétonnes ininterrompues

- Une réalisation en fonction d'un plan cohérent. [SCH 03]

J. Grant, en 2002, la définit quant à lui comme l'association de trois concepts en aménagement :

- l'intensité de l'usage du sol qui se rapproche de la notion de densité,

- la diversité des usages en encourageant la synergie entre des fonctions facilement compatibles

- l'intégration d'usages "exclus" qui pose la question des compatibilités entre fonctions [GRA 02]

En plus d'évoquer les usages "exclus", auxquels peuvent être associées les infrastructures aériennes de transport, cette définition met en avant les principes de coordination et de synergie entre les différentes fonctions associées. En effet, "la diversité fonctionnelle ne signifie pas la multifonctionnalité, qui ajoute l'idée d'une synergie partielle" [PUC 13]. C'est par cette phrase que le Plan Urbanisme Construction Architecture (PUCA) présente différentes intensités de mixité urbaine distinguant ainsi :

- la simple "diversité des fonctions" qui assure "une meilleure utilisation des équipements et des bâtiments". On peut aussi parler de multifonctionnalité alternative ou temporelle : l'ouvrage est adapté à plusieurs fonctions dont l'une fonctionne lorsque l'autre s'arrête (lors d'événements exceptionnels par exemple)

- La "mixité fonctionnelle" qui apporte la "notion de synergie (partielle) entre les fonctions et le développement des activités en fonction des besoins du quartier". Il est ici question de la continuité des usages.

- L' "économie circulaire" où "les produits et sous-produits des activités sont les intrants ou fournitures des autres".

3.2. La mixité fonctionnelle et l'infrastructure aérienne de transport.

La relation entre infrastructure de transport ferroviaire et espace urbain est traitée de différentes façons dans la littérature selon qu'on évoque les gares/station ou les linéaires d'infrastructure entre ces points d'entrée sur le réseau. Autant les gares sont aujourd'hui de plus en plus valorisées pour leur capacité à créer de l'urbanité grâce aux flux de voyageurs, autant les linéaires d'infrastructure restent associés aux nuisances et donc exclus des réflexions sur le tissu urbain. Il est alors question de leur enfouissement ou de leur couverture de manière à les isoler au maximum de l'espace de vie [MAU 15]. Or, si l'enfouissement ou la couverture sont des solutions plébiscitées par la population pour leur absence d'impact à long terme sur la qualité de l'espace urbain, il n'en demeure pas moins que le coût financier d'investissement initial pour la construction de ces aménagements est très élevé (jusqu'à quatre à cinq fois plus cher qu'un tracé en surface ou sur viaduc). De plus, les infrastructures aériennes sont plus faciles et plus rapides à mettre en œuvre que les tunnels. Elles bénéficient donc d'atouts intéressants pour le développement de réseaux de transport, notamment dans les pays en développement, malgré leurs impacts sur le long terme (nuisances sonores, vibrations, dégradation du bâti, etc…).

Il semble que la question des relations entre l'infrastructure aérienne de transport et l'espace urbain n'est que très rarement envisagée du point de vue de la mixité fonctionnelle, c'est-à-dire l'association de la fonction transport avec toute autre fonction urbaine. Les infrastructures aériennes de transport y semblent pourtant propices puisqu'elles permettent de dégager de l'espace au sol et des volumes plus ou moins importants selon leur hauteur. Cependant, l'affectation spécialisée des espaces de la ville induit le fait que ces zones soient souvent considérées comme résiduelles [MAU 10] par la compagnie de transport, restent abandonnées et participent alors à la dégradation de l'environnement. Une étude bibliographique et une enquête sur l'intégration des viaducs dans les villes à travers le monde montrent que l'aménagement a posteriori de ces espaces varie selon divers paramètres (contexte culturel, foncier, réglementaire, de gouvernance) et peut réellement participer à améliorer la qualité du lieu. Dans le cas de la construction d'un nouvel ouvrage, la conception d'un programme mixte autour de la fonction transport ne peut éluder les nuisances issues du système de transport lui-même mais pourrait permettre le développement de programmes attractifs et nécessaires aux riverains, sortes de mesures compensatoires, notamment pour limiter les effets de coupure, de dégradation et d'insécurité dus aux espaces résiduels délaissés.

4. Etude de cas : de la mixité fonctionnelle à la multifonctionnalité de l'ouvrage

Les fonctions qui viennent “coloniser” les espaces résiduels longtemps après la construction de l’ouvrage doivent s’adapter à un espace contraint et à des jeux d’acteurs déjà implantés.

C’est le cas du projet des Arches à Issy-les-Moulineaux en France, réalisé par l’agence d’architecture Dubosc et Landowski sous la Maîtrise d’Ouvrage de la ville. L’implantation de fonctions nouvelles sous les arches du viaduc est un exemple de mixité fonctionnelle au sens donné par le PUCA (cf. ci-dessus) de développement de la continuité des usages et de réponse aux besoins du quartier. Cet aménagement peut également être qualifié de mixité “horizontale”, au sens donné par Jacques Lucan car la fonction transport se superpose à d’autres usages. On verra qu’il n’existe cependant pas de réelle synergie entre le programme transport et les autres programmes développés ultérieurement.

Le viaduc du RER C à Issy-les-Moulineaux a été construit au XIXème siècle. Les espaces sous les arches, longtemps laissés à l’abandon, et aux usages opportunistes tels que le stationnement sauvage, sont finalement investies en 1999 par la mairie qui recherche alors des terrains pour le relogement d’une association d’artistes. Selon les interlocuteurs du projet rencontrés (SNCF Réseau d’une part et l’architecte des nouveaux espaces d’autre part) les discussions pour l’occupation de ces espaces ont été rapides et n’ont pas posé de problèmes particuliers. Le terrain appartenant à SNCF Réseau, une convention d’occupation a été signée avec la mairie pour encadrer les conditions d’usage de ces espaces sous les voies ferroviaires et fixer le prix de location des terrains.

Figure 1. *Les Arches, Issy-les-Moulineaux, France - Agence Dubosc et Landowski*

Les principales contraintes d’occupation données par le propriétaire de l’ouvrage et du terrain (SNCF Réseau) sont les suivantes :

- Uniquement des constructions légères et sans fondations profondes pour ne pas impacter les fondations des piles du viaduc

- Une distinction stricte des constructions et de l’ouvrage aérien : respect d’une distance de 1 mètre des piles et 2 mètres de la voute avec installation d’un échafaudage pour permettre les visites de maintenance et d’entretien de l’ouvrage

- Un système constructif qui puisse être démontable rapidement au cas où des interventions urgentes seraient nécessaires sur l'ouvrage.

- Des limitations concernant les activités implantées et leur raccordement au gaz.

Dans le cas de cet aménagement, la coordination des acteurs a donc été réduite à son minimum à savoir la signature d'une convention d'occupation. Il s'agit d'une location des terrains par la ville et pour une période déterminée selon des contraintes édictée par le propriétaire du foncier et gestionnaire de l'infrastructure aérienne de transport.

En conséquence, les nouvelles constructions demeurent entièrement indépendantes du viaduc et les contraintes de fonctionnement de l'infrastructure ferroviaire, du fait de son antériorité et de la propriété du foncier, restent prioritaires sur les caractéristiques de fonctionnement des activités nouvelles installées en-dessous. Le travail de l'architecte pour l'aménagement de ces espaces est alors extrêmement contraint. Au-delà des exigences résumées ci-dessus et données par le propriétaire du terrain, l'architecte doit aussi prendre en compte le programme fonctionnel des futures activités. Contrairement à une conception traditionnelle ou le programme fonctionnel induit (en tout ou partie) la forme de l'ouvrage, dans le cas présent le programme doit aussi s'adapter au volume disponible. La question de la compatibilité des fonctions est donc prédominante. Le processus de conception doit également être adapté pour permettre plus d'itérations et de concertation avec les futurs occupants.

Dans ce cas particulier, et compte tenu des temporalités différentes de conception, on peut dire que la mixité fonctionnelle à l'échelle réduite de la parcelle n'est que partielle au sens des définitions données précédemment. En effet, même si la fonction transport peut être assimilée à un "usage exclu", il n'y a pas de réelle synergie[2] avec les autres activités implantées en-dessous ni de coordination des acteurs autour d'un projet commun. Il s'agit plus d'une "colonisation" des volumes disponibles a posteriori, sans association aucune entre les systèmes constructifs, fonctionnels ou même de gouvernance. Il semble même que par la convention d'occupation, SNCF Réseau, propriétaire du terrain et de l'infrastructure, soit plus dans une position de protection de son ouvrage vis-à-vis des nouvelles installations.

La différence de temporalité entre les projets limite fortement les possibilités de synergie entre les acteurs (car l'acteur historique reste prédominant) et entre les fonctions (difficile remise en question du fonctionnement de la fonction initiale). De même, les potentielles économies d'échelles ou les coûts associés à la construction de l'infrastructure ne peuvent être partagés puisque les aménagements du dessous ne sont pas envisagés lors de la construction de l'ouvrage.

Cependant, l'aménagement de ces espaces a permis le développement de la mixité fonctionnelle à l'échelle du quartier. Au total, 21 des 24 arches de l'ouvrage sont aménagées pour des équipements publics (salles d'escalade, ateliers d'artistes, espace d'exposition, salle de danse et de musique, cyber-café-musique). Les 3 arches restantes sont à usage de voirie publique et de traversées piétonnes. Dans un secteur principalement résidentiel, cet aménagement a permis à la fois une rentabilisation économique de l'espace pour le gestionnaire de l'infrastructure et une "rentabilisation sociale" en transformant des espaces résiduels délaissés impactant négativement le secteur en des services dédiés à la population.

Une solution pour envisager des projets à la fois rentables et cohérents à l'échelle urbaine semble donc être la simultanéité de conception entre l'infrastructure aérienne de transport et les espaces attenants. Il semble ainsi possible de penser une infrastructure partagée dont les objectifs de conception servent à la fonction transport comme aux fonctions associées (commerces, activités, etc). L'exemple du projet du Bruparken, parc urbain dans la ville de Drammen en Norvège, peut en partie illustrer cette hypothèse). Il s'agit d'un projet de rénovation et d'agrandissement d'un viaduc de l'autoroute E18 qui traverse la ville. Le but est alors d'améliorer sa capacité (passage de deux à quatre voies) pour contribuer à la réduction du trafic routier au centre de la ville. Simultanément a émergé l'idée de réaliser un parc sous cette infrastructure pour profiter des espaces habituellement considérés comme résiduels pour y implanter un parc et des espaces sportifs. Ce projet s'assimile à de la mixité fonctionnelle puisqu'il superpose sur un même espace deux fonctions dont l'une s'intègre à la continuité des usages du quartier. On peut également parler de mixité "horizontale", au sens donné par Jacques Lucan (cf. ci-dessus) avec, en comparaison de l'aménagement des Arches à Issy-les-Moulineaux, une synergie plus importante entre les deux fonctions à travers l'utilisation de l'ouvrage aérien.

[2] Par synergie, on entend la mise en commun, l'action dynamique de cohésion de plusieurs éléments/objets/acteurs en vue d'une finalité commune qui pourrait par exemple être, dans le cas de notre étude, le partage des objets bâtis ou une économie de moyen.

Figure 2. *Bruparken, Drammen, Norvège – Link Arkitektur*

Les institutions publiques, maitres d'ouvrage de ces deux projets (Administration publique en charge des infrastructures routières de l'Etat et Municipalité) se sont donc coordonnées pour envisager ces deux programmes dans un seul et même projet. Ainsi, l'infrastructure n'est plus envisagée uniquement comme objet du transport mais aussi comme support des activités sportives du parc traversé. En effet, sa conception tient compte des choix d'aménagement et des besoins du parc en-dessous : le choix du tablier a été réalisé pour réfléchir la lumière, les piles sont utilisées comme supports pour des murs d'escalade et des installations lumineuses, etc. De même, l'infrastructure n'est pas envisagée comme une contrainte pour l'aménagement du parc mais plutôt comme un atout : le positionnement des activités a été pensé en fonction de la forme du viaduc et de la protection ainsi apportée contre les intempéries. La question de l'insertion de l'infrastructure aérienne dans l'espace urbain est donc allée au-delà d'une simple considération esthétique pour limiter l'impact visuel dans le paysage. On peut considérer que l'ouvrage est devenu, sur ce tronçon, multifonctionnel dans le sens où ses objectifs et contraintes de construction sont le fait de plusieurs programmes et que son usage est partagé entre plusieurs fonctions.

Son acceptation par la population riveraine, qui montrait une forte opposition au projet d'agrandissement, n'en a été que facilité. La zone sous le pont, autrefois délabrée et qui induisait auparavant une déconnexion entre les quartiers de la ville a été transformée par cet aménagement en un espace attractif et intégré au réseau des espaces verts de la région. Les parcours piétons tracés à travers le parc et les équipements sportifs permettent des traversées faciles et sécurisées entre les zones bâties de part d'autre de l'infrastructure. Le parc a contribué à la revitalisation de cette zone de la ville et est devenu un espace public largement utilisé. Les équipements sportifs, notamment le skatepark, installés sous le tablier bénéficient aujourd'hui d'une fréquentation régulière et soutenue par la population environnante et même plus largement à l'échelle de la ville. La protection vis-à-vis des intempéries apportée par l'ouvrage garanti à ces espaces d'être utilisables même par temps de pluie ou de neige.

Cet exemple d'aménagement montre qu'au-delà de qualité de vie et de la mixité fonctionnelle apportée à la zone traversée, l'utilisation des espaces sous les infrastructures aériennes de transport peut également permettre d'envisager la multifonctionnalité de l'ouvrage lui-même ce qui ouvre de nouvelles perspectives en terme de conception, de financement de l'infrastructure ou de son entretien/maintenance et de valorisation du foncier dédié aux réseaux de transport. Cette multifonctionnalité de l'ouvrage ne peut être envisagée que par une programmation mixte en amont de la construction définissant les objectifs et contraintes des différentes fonctions autour d'un projet commun et partagé entre plusieurs maîtrises d'ouvrages. La coordination des acteurs autour d'un plan d'ensemble cohérent peut donc permettre la réalisation d'une infrastructure mixte répondant aux besoins du système de transport et au système urbain.

5. Conclusion : les atouts du dépassement du clivage entre technique et urbanisme

Les deux exemples présentés montrent à quel point l'utilisation des espaces résiduels des infrastructures aériennes de transport peut améliorer la qualité de vie aux abords de ces ouvrages. Leur intégration dans l'espace urbain, au sens de leur inclusion au système urbain global s'en trouve améliorée sans remise en question de l'efficience du système de transport. De plus, dans un contexte de fortes contraintes budgétaires pour les aménagements et les projets urbains, ce genre d'urbanisme de mutualisation des coûts et des espaces semble pertinent.

La mixité fonctionnelle ainsi développée peut être envisagée à plusieurs échelles, de la parcelle au quartier, selon la temporalité de réalisation des projets. Ainsi une programmation simultanée permettra de créer plus de synergie entre les programmes superposés pour éventuellement parvenir à une multifonctionnalité de l'ouvrage aérien lui-même, conçu pour être à la fois le support du système de transport et d'autres usages urbains.

Cette infrastructure multifonctionnelle apporte diverses perspectives. Premièrement, une rentabilisation économique de l'ouvrage et des espaces résiduels dont l'usage (location, etc…) peut participer au financement même de l'infrastructure. Deuxièmement, une rentabilisation sociale puisqu'on passe d'espaces résiduels à des lieux aménagés pour le bien-être de la population et qui participent à la qualité des espaces urbains parcourus par l'infrastructure.

La mise en œuvre de ces infrastructures mutualisées augmente la complexité du montage opérationnel. En multipliant les fonctions, on augmente le nombre d'acteurs autant que les contraintes de conception du projet et on complexifie de fait la réalisation : maîtrise d'ouvrage multiple et coordination de compétences n'ayant pas pour habitude de travailler de concert.

Pour que de telles infrastructures voient le jour il est donc nécessaire de réfléchir aux méthodes de projet permettant d'associer l'ensemble des acteurs et de coordonner leurs enjeux et contraintes, aussi divers soient-ils, autour d'un projet commun. Ce regard croisé entre espace urbain et infrastructure aérienne de transport nous mène maintenant à étudier les méthodes de travail collaboratives pour envisager une méthodologie d'approche adaptée à la mixité fonctionnelle des infrastructures aériennes de transport.

6. Bibliographie

[ALO 13] ALONZO E., L'Architecture de la voie : histoire et théories, Thèse de doctorat, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, 2013.

[ANC 14] ANCIAES P., JONES P., MINDELL J.S., "Quantifying community severance – a literature review", *Street mobility and network accessibility: towards tools for overcoming barriers to walking amongst older people*, series working paper 02, 2014, p. 1–38.

[BEA 12] BEAUDET G., WOLF P., "La circulation, la ville et l'urbanisme : de la technicisation des transports au concept de mobilité". *VertigO - La Revue Électronique En Sciences de L'environnement*, Hors-Série 11, p. 1-22, 2012.

[BEC 04] BECUE V., TELLER J., Comment concevoir un quartier « multifonction » pour promouvoir un développement urbain durable ?, p.1–8, 2004.

[BOU 11] BOUTAUD A., Ecologie et développement durable : quelques questions "pièges", Communauté urbaine de Lyon, 2011

[DAC 09] DA CUNHA A., KAISER C., « Densité, centralité et qualité urbaine : la notion de densité, outil pour une gestion adaptative des formes urbaines ? », *Urbia – Les Cahiers Du Développement Urbain Durable*, n°9, p. 13-56, 2009

[GRA 02] GRANT J., "Mixed Use in Theory and Practice: Canadian Experience with Implementing a Planning Principle", *Journal of the American Planning Association*, Vol 68, n°1, p. 71–84

[HER 11] HERAN F., « Pour une approche systémique des nuisances liées aux transports en milieu urbain », *Les Cahiers Scientifiques Du Transport*, n°59, p. 83–112

[KAM 14] KAMINAGAI Y. (dir), *Tramway : une école française*, 2014

[LEC 57] LE CORBUSIER, La Charte d'Athènes, Paris, Editions de Minuit, collection Points, 1957

[LEV 85] LEVY A., « Infrastructure viaire et forme urbaine. Genèse et développement d'un concept ». *Espace et Sociétés*, vol 96, Infrastructures et formes urbaines, tome II Architecture des réseaux, p. 31–50, 1985

[LUC 12] LUCAN J., *Où va la ville aujourd'hui ? Formes urbaines et mixité*, Paris, Editions de la Villette, 2012

[MAR 12] MARRY S., ARANTES L., « Etalement et densité : quels enjeux urbains à l'œuvre dans la conception des formes urbaines ? », *Urbia - Les Cahiers Du Développement Urbain Durable*, n°15, p. 195–217, 2012

[MAU 10] MAURICE G., « L'archipel des délaissés », *Critique*, vol 6, n° 757-758, p. 542-550, 2010

[MAU 15] MAURIN-FUND M., « Modélisation et évaluation de couvertures d'infrastructures routières et ferroviaires en milieu urbain », *Rencontres Universitaires de Génie Civil*, p. 1-8, 2015

[PUC 13] PUCA (Plan Urbanisme Construction Architecture), Mixité fonctionnelle versus zoning : de nouveaux enjeux ?, Rapport final, Fondation des villes, p. 1-170, 2013

[SAN 11] SANTOS Y GANGES L., « Comment intégrer le train dans la ville ? Quelques réflexions depuis le cas espagnol », *Métropolitiques*, p.1-5, 2011

[SCH 03] SCHWANKE D., PHILLIPS P. et al, *Mixed-Use Development Handbook, Second Edition*, Washington, D.C., ULI – The Urban Land Institute, 2003