

Corrélations technico-économiques pour la modélisation d'un système de trigénération pour bâtiments. Application sur le campus de l'Université Paris Nanterre.

Arthur DUPUY^{1*}, Lavinia GROSU¹, Khahn-Hung TRAN¹, Sirine SAÏDI¹

¹Laboratoire Énergétique Mécanique Électromagnétisme, LEME, Université Paris Nanterre 50 rue de Sèvres – 92410 Ville d'Avray

*(auteur correspondant : arthur.dupuy@parisnanterre.fr)

Résumé - Dans le contexte énergétique et économique actuel, les machines de trigénération permettent d'augmenter la part d'énergies renouvelables dans le secteur du bâtiment, tout en préservant les équilibres financiers. Ce travail s'inscrit dans l'étude et l'optimisation d'un système de trigénération, pour une application concrète sur le campus de l'Université Paris Nanterre. Des corrélations technico-économiques permettant de relier le coût d'un composant à ses caractéristiques techniques sont proposées.

Nomenclature

A	surface d'échange, m ²	T	température, K
c	coût unitaire, €/Wh	\dot{W}	puissance mécanique, W
C	coût, €	<i>Symboles grecs</i>	
\dot{C}	flux monétaire, €/h	η	rendement
E	énergie, J	ξ	taux de dissipation
ex	exergie spécifique, J/kg	ϕ	facteur de maintenance
Ex	exergie, J	τ	facteur de retour sur investissement
$\dot{E}x$	flux d'exergie, W	<i>Indices et exposants</i>	
h	enthalpie spécifique, J/kg	D	Dissipation
m	masse, kg	e, s	entrée, sortie
\dot{m}	débit massique, kg/s	$evap$	évaporateur
n	nombre d'années pour récupérer le capital	ex	exergétique
N	nombre d'heures de fonctionnement annuel	FC	Fluide Caloporteur
Q	chaleur, J	FF	Fluide Frigorigène
\dot{Q}	flux de chaleur, W	irr	irréversibilité
s	entropie spécifique, J/K.kg	m	moyenne
S	entropie, J/K	P	Produit
\dot{S}	flux d'entropie, W/K	R	Ressource
t	temps		

1. Introduction

Dans le contexte énergétique et économique actuel, il apparaît urgent de réduire les émissions de gaz à effet de serre, d'augmenter la part d'énergies renouvelables dans notre mix énergétique et d'améliorer l'efficacité des procédés tout en préservant les équilibres financiers. [1]. Le développement de machines de trigénération offre une solution prometteuse dans le secteur du bâtiment. La trigénération implique la production simultanée de chauffage, de refroidissement et d'électricité, ce qui la rend particulièrement adaptée à des bâtiments tels que les écoles et les universités. Ces systèmes peuvent présenter une diversité de configuration utilisant des

composants tels que les chaudières, compresseurs, turbines, échangeurs de chaleurs etc., ainsi que des structures variables (ordre des composants, en série ou en parallèle, etc..) qui varieront selon les objectifs recherchés, notamment le type d'énergie le plus valorisé en fin de processus. L'optimisation de ces systèmes repose principalement sur l'utilisation de sources renouvelables (géothermie, énergie solaire, biocombustibles) ainsi que sur l'amélioration des rendements énergétique et exergetique [2].

L'intégration d'un système de stockage d'énergie s'avère indispensable lorsque les systèmes énergétiques opèrent avec des énergies renouvelables dont la production est intermittente, afin de moduler les temps de fonctionnement des machines. Ce stockage permet alors de restituer l'énergie au moment où les besoins énergétiques sont les plus élevés. La batterie de Carnot, par exemple, permet le stockage de l'énergie électrique sous forme de chaleur.

L'objectif de ce travail concerne le développement de corrélations technico-économiques nécessaires pour compléter le modèle énergétique, exergetique et économique du système de trigénération étudié, pour une application dans le secteur des bâtiments, plus particulièrement sur le campus de l'Université Paris Nanterre

2. Le site de l'Université Paris Nanterre-étude thermique des bâtiments

L'Université Paris Nanterre est située à Nanterre (92), en région parisienne. Sa construction a démarré en 1964 par la "barre historique" située sur l'aile ouest du site [15] et s'acheva en 1969. De nombreux bâtiments complétèrent le campus tels que le centre sportif ou la bibliothèque "La Contemporaine", certifiée Haute Qualité Environnementale (HQE).

L'objectif de cette étude est d'établir les besoins énergétiques du campus et des consommations qui en découlent afin de dimensionner au mieux le système de trigénération. Pour cette étude, une méthode d'estimation simplifiée pourrait convenir, afin d'éviter les temps de calculs importants engendrés par une simulation thermique dynamique (STD) du bâtiment. Plusieurs approches sont possibles : l'approche par factures énergétiques permet d'établir les consommations mais ne donne pas d'informations sur la qualité de construction et d'isolation des bâtiments, des informations pourtant essentielles dans la conception d'un système complet. Les données techniques sont quant à elles difficiles à obtenir et donc à exploiter, et ne tiennent non plus pas compte d'éventuelles dégradations de la performance des isolants.

La solution choisie est donc d'employer la méthode 3CL (Calcul de la Consommation Conventiennelle des Logements). Cette technique a été instaurée en 2006 pour répondre aux exigences de la directive européenne sur la performance énergétique des logements. Pour mesurer les quantités d'énergie consommée et de gaz carbonique rejeté dans l'air, la méthode 3CL se base sur un usage standardisé du logement, en fonction d'hypothèses de fonctionnement[14].

Ces critères permettent la standardisation des sollicitations du bâtiment (usage et environnement standards) permettant ainsi d'isoler la performance de l'enveloppe et des systèmes de chauffage, de refroidissement et d'eau chaude sanitaire. Ces hypothèses ne sont cependant pas adaptées à l'étude d'un bâtiment tertiaire. Elles ont par conséquent été modifiées pour adapter le modèle à l'usage d'un établissement scolaire/d'une université :

- les bâtiments sont occupés 5j/semaine, 10h/jour (lundi au vendredi, de 8h à 18h) ;
- les périodes d'occupation sont choisies selon le calendrier universitaire 2023-2024 de l'Université Paris-Nanterre (fermeture estivale de 4 semaines, fermeture hivernale fin décembre, etc..);
- le besoin en ECS (Eau Chaude Sanitaire) est de 2L à 40°C par occupant et par jour [4] ;

- le nombre d’occupants est connu ou calculé selon la surface totale des bâtiments (hors couloirs/sanitaires, avec $4m^2$ d’espace personnel/occupant) ;
- la température intérieure est de $19^{\circ}C$ lors des périodes d’occupation, de $16^{\circ}C$ la nuit et lors des périodes d’inoccupation (week-ends et jours fériés, vacances).

Afin de valider les hypothèses avancées, une comparaison a été réalisée entre les résultats obtenus par la méthode 3CL modifiée et les informations extraites des Diagnostics de Performance Énergétique (DPE) de deux collèges du Val-de-Marne (94), établis à partir des factures [5] .

		Collège Jean Lurçat	Collège Aimé Césaire	Bâtiment REMOND
Année de construction		1969	2009	1964
GES	ADEME/	24	15	37.5
Y.	CANIVET			
	($kgCO_2/m^2.an$)			
Conso finale chauffage		800 946	719 374	934 334
	(kWh/an)			
GES	3CL	30	21	38
	($kgCO_2/m^2.an$)			
Conso finale	3CL	850 852	775 729	973 179
	(kWh/an)			
Ecart GES		25%	40%	1.33%
Ecart conso		6,23%	7,83%	4.16%

Tableau 1 : Tableau de comparaison entre les valeurs extraites et calculées



Figure 1 : Comparaison GES ADEME/3CL

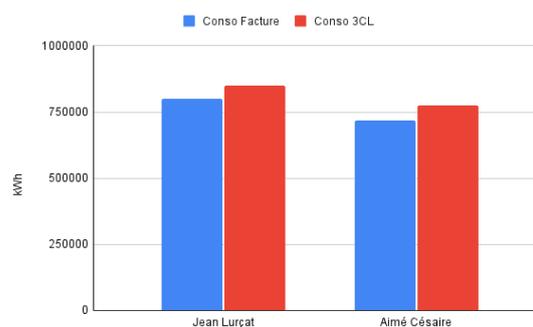


Figure 2 : Comparaison Consommation ADEME/3CL

On remarque que les écarts obtenus entre les consommations publiées par l’ADEME et les résultats obtenus par la méthode 3CL modifiée sont inférieures à 10%. Des écarts plus importants sont constatés sur l’estimation des émissions de gaz à effet de serre, qui peuvent être expliqués par différents modes de comptage utilisés : empreinte carbone, GES etc. Les résultats obtenus confirmant ainsi la validité des hypothèses choisies, le modèle 3CL modifié a été ensuite utilisé pour l’étude thermique du bâtiment « REMOND » du campus de Nanterre (construit en 1964), pour lequel les factures ne sont pas disponibles.

Les résultats obtenus ont été comparés à ceux publiés dans la thèse d’Yvain CANIVET [7], qui a effectué une Simulation Thermique Dynamique du même bâtiment, en utilisant l’outil COMFIE Pléiade. Les données utilisées sont fournies Tableau 1.

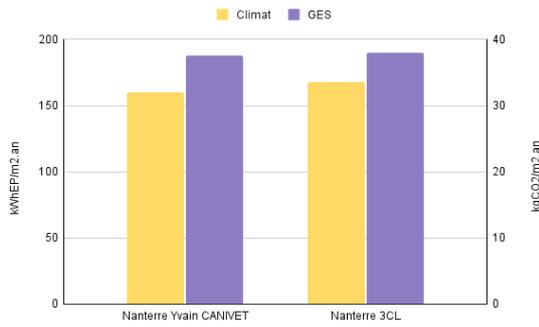


Figure 3 : Comparaison Climat et GES

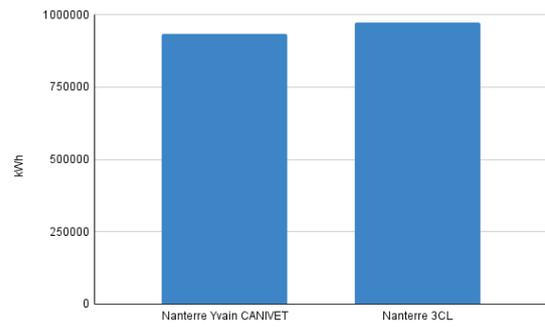


Figure 4 : Comparaison consommations

Les écarts obtenus étant inférieurs à 5%, il peut être conclu que la méthode 3CL modifiée estime avec précision les consommations de ce bâtiment, situé sur le site d'étude. Cette méthode sera appliquée par la suite à tout le campus de l'Université de Nanterre.

3. Modèle thermo-économique du système de trigénération

La méthode de calcul des consommations étant validée, il convient désormais de modéliser et d'optimiser le système de trigénération. Le système de trigénération présenté ci-dessous est en phase d'étude. Plusieurs configurations sont analysées, utilisant plusieurs sources énergétiques renouvelables. Une configuration initiale est présentée sur la Figure 5. Le stockage thermodynamique est proposé par Batterie de Carnot, qui permet de mutualiser les échangeurs et de valoriser au mieux la chaleur récupérée par la PAC (Pompe À Chaleur) [3]. Une machine à absorption (LiBr/eau) assure le rafraîchissement solaire des locaux en utilisant des panneaux solaires thermiques et le stockage thermodynamique [13].

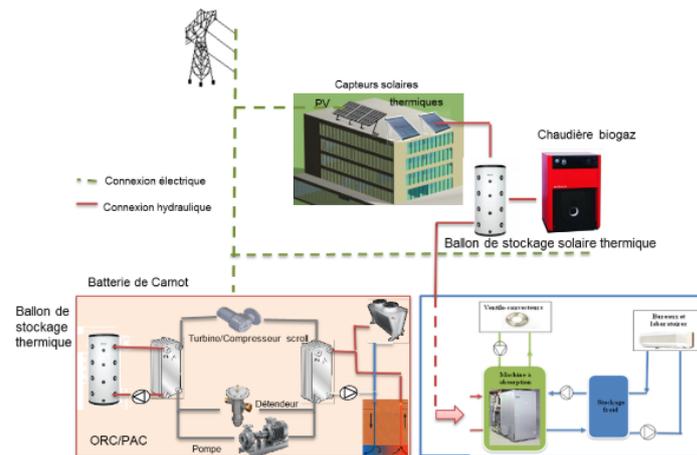


Figure 5 : Schéma d'un système de trigénération avec batterie de Carnot

L'optimisation du système complet débute par l'étude de ses différents composants, pour lesquels on établit les bilans massique, énergétique, entropique et exergetique suivants :

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q} + \sum \dot{W} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \dot{S}^{irr} \quad (3)$$

$$\frac{dEx}{dt} = \sum \dot{E}x_Q^T + \sum \dot{W} + p_0 \frac{dV}{dt} + \sum \dot{m}_e ex_e - \sum \dot{m}_s ex_s + T_0 \dot{S}^{irr} \quad (4)$$

avec

$$ex_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (5)$$

Pour chaque composant, on définit également les flux d'exergie "Ressource", "Produit" et "Dissipation". On obtient ainsi le rendement exergetique du composant :

$$\eta_{ex} = \frac{Produit}{Ressource} = \frac{\dot{E}x^P}{\dot{E}x^R} \quad (6)$$

et son taux de dissipation

$$\xi = \frac{Dissipation}{Ressource} = \frac{\dot{E}x^D}{\dot{E}x^R} \quad (7)$$

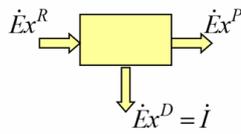


Figure 6 : Schématisation des flux exergetiques d'un composant

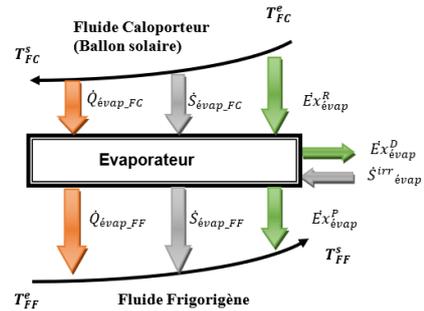


Figure 7 : Diagramme fonctionnel d'un évaporateur

À titre d'exemple, ces équations sont appliquées dans ce qui suit à un échangeur de chaleur, ici un évaporateur. Les pertes de charges sont nulles, l'isolation est supposée parfaite et le régime est permanent.

L'irréversibilité au niveau de l'évaporateur peut être obtenue grâce au bilan entropique ou au bilan exergetique (Figure 8).

Le flux d'entropie reçu par le fluide frigorigène s'écrit :

$$\dot{S}_{evapFF} = \dot{m}_{FF}(s_{FF}^s - s_{FF}^e) = \frac{\dot{Q}_{evapFF}}{T_{mFF}} > 0 \quad (8)$$

et le flux d'entropie émis par le fluide caloporteur s'écrit

$$\dot{S}_{evapFC} = \dot{m}_{FC}(s_{FC}^s - s_{FC}^e) \quad (9)$$

Ainsi, l'entropie créée en raison du pincement de température dans l'échangeur est la différence entre les deux flux en valeur absolue ci-dessus :

$$\dot{S}_{evap}^{irr} = \dot{m}_{FF}(s_{FF}^s - s_{FF}^e) - \dot{m}_{FC}(s_{FC}^e - s_{FC}^s) \quad (10)$$

D'après le théorème de Gouy-Stodola, l'irréversibilité associée à ce transfert de chaleur dans ce composant s'écrit alors :

$$\dot{I}_{evap} = T_0 \dot{S}_{evap}^{irr} \quad (11)$$

L'irréversibilité du transfert de chaleur étant égale à l'exergie détruite lors de ce transfert, elle peut être obtenue également par cette approche exergetique.

$$\dot{I}_{evap} = \dot{E}x_{evap}^D = \dot{E}x_{evap}^R - \dot{E}x_{evap}^P \quad (12)$$

où la Ressource du composant représente le flux d'exergie cédée par le fluide caloporteur

$$\dot{E}x_{evap}^R = \dot{E}x_{Q_{evap}}^{T_{mFC}} = \dot{Q}_{evap} \left(1 - \frac{T_0}{T_{mFC}}\right) \quad (13)$$

avec T_{mFC} la température moyenne logarithmique du fluide caloporteur

$$T_{mFC} = \frac{T_{FC}^s - T_{FC}^e}{\ln \frac{T_{FC}^s}{T_{FC}^e}} \quad (14)$$

et le "Produit" de ce composant représente le flux d'exergie fourni au fluide frigorigène

$$\dot{E}x_{evapFF} = \dot{m}_{FF}(ex_{FF}^s - ex_{FF}^e) = \dot{Q}_{evapFF} \left(1 - \frac{T_0}{T_{mFF}}\right) \quad (15)$$

La différence entre la ressource et le produit est dissipée, en raison du pincement de température au sein de l'évaporateur

$$\dot{I}_{evap} = \dot{Q}_{evap} \left(1 - \frac{T_0}{T_{mFC}}\right) - \dot{Q}_{evapFF} \left(1 - \frac{T_0}{T_{mFF}}\right) = \dot{m}_{FC}(ex_{FC}^e - ex_{FC}^s) - \dot{m}_{FF}(ex_{FF}^s - ex_{FF}^e) \quad (16)$$

L'optimisation d'un système thermodynamique complexe n'est pas guidée uniquement par la recherche de la meilleure performance technique. Cette optimisation est nécessairement complétée par une analyse économique. Le développement d'analyses thermo-économiques répond au besoin de conjuguer l'optimisation simultanée de ces facteurs [7].

Pour chaque composant, on peut alors écrire un bilan exergo-économique, qui permettra de relier le coût du composant (€) au coût par seconde (€/s) des flux nécessaires à son fonctionnement [8].

On peut ainsi écrire

$$\sum c_s \dot{E}x_s + c_W \dot{W} = \sum c_e \dot{E}x_e + c_Q \dot{Q} + \dot{C} \quad (17)$$

Le coût d'investissement d'un composant, C, est un coût ponctuel qui peut être converti en coût annuel à l'aide du facteur de récupération de capital, τ :

$$\tau = \frac{i_r(1 + i_r)^n}{(1 + i_r)^n - 1} \quad (18)$$

Ainsi, le coût d'investissement horaire peut être exprimé comme suit :

$$\dot{C} = \frac{C\tau\Phi}{N} \quad (19)$$

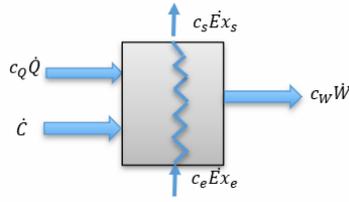


Figure 8 : Bilan exergo-économique

4. Corrélations technico-économiques

L'étude économique est effectuée à l'aide des coûts des différents composants du système thermodynamique. Il convient alors de développer des corrélations entre le coût d'un composant et certaines de ces caractéristiques (surface d'échange, rendement, puissance. . .). Plusieurs corrélations existent dans la littérature afin d'estimer les coûts à partir de catalogues de fabricants selon le composant sélectionné (pompe, compresseur, échangeur de chaleur. . .). Pour les évaporateurs, il existe par exemple des corrélations telles que [9, 10, 11] :

$$C_{evap} = a \times A + b \quad (20)$$

$$C_{evap} = a \times A_{evap}^2 + b \quad (21)$$

$$C_{evap} = C_0 \times \left(\frac{A}{A_0}\right)^{0.6} \quad (22)$$

Cependant, ces corrélations existantes ne sont pas nécessairement valables pour tous les évaporateurs (selon leur surface, la technologie employée, etc. . .). En se basant sur le catalogue Pecomark Réfrigération 2023 [12], qui propose une gamme de produits adaptés à ce projet, on obtient les corrélations suivantes, pour des surfaces d'échange comprises entre 1.5 et 57 m².

$$C_{degré3} = 0.0352A^3 - 2.683A^2 + 127.2A + 44.48 \quad (23)$$

$$C_{degré2} = -0.2843A^2 + 82.1A + 210.6 \quad (24)$$

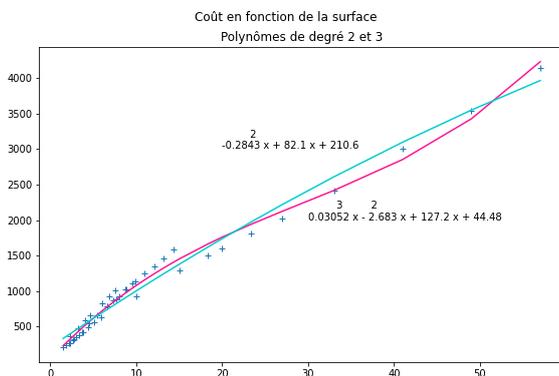


Figure 9 : Interpolations polynômiales de degré 2 et 3, Catalogue Pecomark réfrigération



Figure 10 : Comparaison entre corrélations pour évaporateurs

Il est alors possible de comparer ces résultats avec ceux obtenus pour certaines corrélations précédentes. En adaptant les coefficients de référence on obtient les résultats Figure 10.

Il n'apparaît pas nécessaire d'augmenter le degré au vu de la précision des résultats pour les polynômes de degré 2 et 3. En prenant une surface de référence de $1.5m^2$ et un coût de référence de 400 euros, la corrélation (22) offre également de bons résultats, ce qui valide le choix de ces coefficients. La corrélation (22), de même que les corrélations de degré 2 et 3, sont également disponibles pour d'autres composants tels que les compresseurs et les condenseurs du système de trigénération.

5. Conclusion

Le développement de machines de trigénération offre une solution prometteuse dans le secteur du bâtiment, par la fourniture simultanée de chauffage, rafraîchissement et électricité. Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude thermo-économique d'un système de trigénération pour le campus de l'Université Paris Nanterre. L'étude thermique des bâtiments est réalisée en se basant sur la méthode conventionnelle 3CL. Des modifications sont proposées pour l'adapter aux scénarii d'utilisation du campus. Le développement de corrélations technico-économiques, permettant de relier le coût d'un composant à ses caractéristiques techniques s'avère nécessaire pour compléter le modèle thermo-économique du système. Dans cet article, des nouvelles corrélations sont proposées, pour des évaporateurs adaptés au système de trigénération étudié. Ce travail doit être poursuivi afin d'adapter ces corrélations à un plus grand nombre de composants.

Références

- [1] Ministère de la Transition Ecologique, 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/renovation-energetique>
- [2] Beniasadi E et al., Exergy-economic analysis of a solar-geothermal combined cooling, heating, power and water generation system for a zero-energy building, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.186>
- [3] Olivier Dumont, Guido Francesco Frate, Aditya Pillai, Steven Lecompte, Michel De paepe, Vincent Lemort, Carnot battery technology : A state-of-the-art review, *Journal of Energy Storage*, Volume 32, 2020, 101756, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101756>.
- [4] ADEME, Vers une meilleure connaissance des besoins en eau chaude sanitaire en tertiaire, Septembre 2020
- [5] ADEME, DPE tertiaire (depuis juillet 2021) - Etiquettes DPE, consulté le 16/11/2023
- [6] Canivet Y, PhD thesis, *Analyse entropique et exergetique des systemes energetiques par des representations geometriques*, 2017
- [7] Lallemand, André, *Energie, exergie, économie, thermo-économie*, 2007
- [8] L. Grosu et al., Technico-economic simulation and optimization of a compression refrigerating machine, *Energy Conversion Management* 40 (1999) 1651-1660
- [9] Paez Alvarez A., PhD thesis, *Optimisation énergétique d'un groupe frigorifique au CO2 transcritique*, 2023
- [10] V.H. Rangel-Hernández et al., Exergoeconomic performance comparison of R1234yf as a drop-in replacement for R134a in a domestic refrigerator *International Journal of Refrigeration* 100 (2019) 113–123
- [11] Valencia Ochoa et al., Thermo-Economic Assessment of a Gas Microturbine-Absorption Chiller Trigeneration System under Different Compressor Inlet Air Temperatures *Energies*, 2019
- [12] Pecomark, Catalogue Réfrigération - Octobre 2023
- [13] Grosu, L., Marin, A., Dobrovicescu, A., Queiros-Condé, D., Exergetic approach for a solar combined system : Organic Rankine Cycle and absorption cooling system, *Int J Energy and Environmental Engineering* (2016) 7(4) : 449-459. doi :10.1007/s40095-015-0168-y
- [14] Ministère de la transition écologique, Méthode 3CL-DPE
- [15] Université Paris Nanterre, <https://www.parisnanterre.fr/infos-pratiques/plan-du-campus-universite-paris-nanterre>