

اسم المؤلف: TELLACHE Asmaa



العنوان: Impact des toitures végétalisées sur la consommation énergétique des bâtiments sous un climat méditerranéen

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

شعار الجامعة

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الجزائر 03

المخبر المنظم للملتقى: كلية العلوم الاقتصادية التجارية وعلوم التسيير

فرقة البحث المنظمة للملتقى: فرقة البحث التكويني الجامعي PRFFU

الملتقى الوطني: "التمويل الأخضر في الجزائر"

نحو تمويل داعم لمشاريع الطاقة المتجددة ومساهم في التنمية المستدامة

المحور 4: أهمية التوجه نحو الاعتماد على الطاقة المتجددة

عنوان المداخلة مترجم: تأثير الأسطح الخضراء على استهلاك الطاقة للمباني تحت مناخ البحر الأبيض المتوسط

اسم ولقب المؤلف¹: طلاش أسماء

جامعة الانتماء: جامعة الجزائر 01 / قسم الهندسة المعمارية.

البريد الإلكتروني المهني: a.tellache@univ-alger.dz

الرقم التعريفي للباحث *orcid*: 0000-0003-4846-7809

الملخص:

تشكل الاسقف الخضراء بديلا ملائما عن المساحات الخضراء التي تكون عادة على مساحة ارضية مخصصة للتعمير لأنها تسمح بإنشاء مساحات نباتية مباشرة على الاسطح وخلق انظمة بيئية مصغرة بالإضافة الى العديد من المزايا الاخرى، على الصعيد البيئي والايكولوجي والاقتصادي والاجتماعي. كما انها تلعب دورا مهما في تنظيم النسق الحراري للأبنية مما جعلها من اكثر التقنيات اعتمادا في كثير من الدول المتقدمة تحت هدف التقليل من الاعتماد التلقائي على المكيفات الهوائية او السخانات والحد من انبعاثات غازات الدفيئة. ان الهدف الاساسي من هذا البحث هو التحقق من قدرة الترطيب داخل الابنية وتقييم الاستهلاك الطاقوي من خلال تطبيق هذه التقنية في مدينة بومرداس ذات لإجراء محاكاة حاسوبية على المناخ المتوسطي. ومن اجل هذا الهدف تم استخدام البرنامج الحاسوبي ArchiWizard سطح ثانوية فرانس فانون.

¹ نبذة عن المؤلف (طلاش أسماء، جامعة الجزائر 01، كلية العلوم، الهندسة المعمارية، العمارة والبيئة الحضرية، -0000

(0003-4846-7809

<https://www.researchgate.net/profile/Tellache-Asma>

العنوان: Impact des toitures végétalisées sur la consommation énergétique des bâtiments sous un climat méditerranéen
اسم المؤلف: TELLACHE Asmaa
النتائج المتحصل عليها من خلال هذه المحاكاة تثبت قدرة السقف النباتي على التقليل من الحاجة الطاقوية للمبنى وبالتالي التقليل من تمويل المباني.

الكلمات المفتاحية: أسقف خضراء، نسق حراري، استهلاك طاقي، مناخ متوسطي.

Résumé

Les toitures vertes constituent une substitution aux espaces verts au sol sacrifiés par l'urbanisation, puisqu'elles permettent la restitution des surfaces végétales sur les toits, la création de microclimats, et d'innombrables autres avantages ; d'ordre environnemental, économique, social... Toutefois, c'est son rôle de régulateur de confort thermique des bâtiments qui est le plus prisé dans la plupart des pays développés depuis quelques années. Et ce, dans le but de diminuer le recours systématique aux climatiseurs et aux chauffages, et de réduire les gaz à effet de serre et la consommation énergétique. Le principal objectif à travers notre recherche est, d'évaluer la consommation énergétique engendrée par ce système sous le climat méditerranéen de Boumerdes. Pour ce faire, une simulation expérimentale avec le logiciel ArchiWizard a été faite sur la terrasse du lycée Frantz Fanon. Les résultats de cette expérience attestent de la capacité à réduire les besoins énergétiques par les toits végétaux.

Mots clés : Toiture végétale, confort thermique intérieur, consommation énergétique, climat méditerranéen.

Introduction :

Les villes méditerranéennes connaissent une évolution intensive de leurs espaces minéraux, ce qui a engendré la surchauffe de la température ambiante, et l'augmentation de la consommation en énergie nécessaire à la climatisation. Cette évolution est également constatée au niveau des villes du nord de l'Algérie, qui connaissent l'accroissement en surface des espaces urbains minéraux, et la réduction des espaces végétalisés, ce qui a produit la surchauffe des températures dans ces villes notamment en été. A nos jours, le constat effectué révèle que les bâtiments situés dans les villes côtières souffrent en été d'un inconfort thermique frappant. Pour cela, la question de la réintroduction de la nature en ville est devenue cruciale pour la réglementation du confort thermique des bâtiments. À titre d'exemple, une étude réalisée en France par le cabinet Ernst & Young affirme que 7 personnes sur 10 préfèrent que les espaces verts soient un critère décisif dans le choix de leur lieu d'habitation, et plus d'une personne sur deux souhaite que soit instaurée l'obligation d'un pourcentage minimum d'espaces verts dans les projets immobiliers et commerciaux (d'Azur, 2009).

Le recours à une réflexion relative à l'usage des toitures végétalisées pour les villes méditerranéennes nous semble sérieuse en raison de leurs nombreux apports. En effet, cette technique ingénieuse est une solution bioclimatique et efficace pouvant servir à adoucir la température de l'air à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments. Ainsi, ce type de réalisation permet de restituer sur les toitures les surfaces végétales perdues au sol, créer des microclimats plus cléments, et ainsi que d'autres innombrables avantages.

Notre travail porte sur l'impact des toits verts sur le confort thermique et la consommation énergétique des bâtiments situés au bord de la mer méditerranéenne. Afin d'aboutir aux objectifs, une simulation 3D a été réalisée sur un bâtiment existant « le lycée Frantz Fanon - Boumerdes ». Nous allons évaluer le confort thermique intérieur et la consommation énergétique de ce bâtiment pour le cas réel (toiture minérale), et pour le cas proposé de toiture végétalisée, et comparer les résultats obtenus pour les deux cas de simulation.

Malgré la découverte de conséquentes réserves d'hydrocarbures non conventionnels relatif aux réserves conventionnelles a été annoncé en Algérie dès 2008, l'accroissement de la consommation locale pèse de plus en plus sur la stratégie énergétique des autorités algériennes : en 2018, l'Algérie a consommé 42,7 milliards de m³ de gaz (soit 64% de la production annuelle du pays) et environ 414 000 barils/jour de pétrole (soit 34% de la production annuelle)(Benhalilou, 2008). L'offre en énergies renouvelables (très peu exploitées en Algérie) est actuellement insuffisante alors qu'elle pourrait incontestablement pallier la baisse des réserves conventionnelles de gaz et de pétrole. Si nous divisons cette énorme consommation par secteur, nous remarquons que le secteur le plus consommateur est celui du bâtiment avec un pourcentage de plus de 41% de la production totale de l'énergie(Laafer, 2021).

Ce papier a comme objectif de présenter une étude qui consiste à réduire la consommation énergétique en termes de climatisation et de chauffage, et améliorer le confort thermique et visuel des bâtiments réduisant ainsi le budget de ces dernières et les gaz à effet de serre.

Etat de l'art

Plusieurs études ont été faites sur l'îlot de chaleur urbain que ce soit sur le climat méditerranéen comme le cas d'Alger(Tarik, 2011) ou sur le climat Aride comme le cas du Sud de pays et même le climat semi-aride le cas de Constantine(ABDERRAZAK Adjiel, 2010) ces études ont révélé que la végétalisation de la ville et des bâtiments est très efficace pour l'ambiance thermique.

La toiture végétalisée est aussi reconnue pour sa capacité d'isolant thermique à l'échelle architecturale, en particulier en cas de fortes chaleurs telles que celles connues en Algérie. En effet, alors qu'un toit en béton peut atteindre 60 à 70°C, la toiture végétalisée ne dépasse pas 15 à 20°C(d'Azur, 2009). Or, la température de la toiture influe sur la température intérieure d'un logement et donc sur les éventuels besoins en climatisation.

L'étude, « Un projet pour quantifier les avantages des terrasses-jardins », menée par le Conseil National de recherches du Canada, révèle également que la toiture végétalisée permet de réduire les échanges thermiques à travers le toit. Lors de l'expérience menée, au printemps et à l'été de 2001, le toit vert a permis de réduire la chaleur totale qui pénètre dans le bâtiment durant le jour de plus de 85 % et celle qui s'échappe du bâtiment la nuit d'environ 70 % (d'Azur, 2009). Par voie de conséquence l'énergie requise pour la climatisation durant les mois chauds ainsi que les dépenses engendrées se trouvent diminuées.

Le projet « Simuler la performance énergétique des toits verts pour le climat de NINGBO, mener par le Centre des technologies énergétiques durables CSET en Chine » a été menée sur l'impact de différents types de toitures sur la réduction des températures à l'intérieur du

énergétique des bâtiments sous un climat méditerranéen bâtiment. La partie expérimentale de cette étude s'est déroulée dans le bâtiment CSET, situé sur le campus de l'Université de Nottingham à Ningbo. Le bâtiment CSET intègre un certain nombre de technologies de construction, notamment un toit vert intensif au-dessus de ses laboratoires. Les résultats ont révélé que les toits verts pourraient offrir des économies significatives sur la charge de chauffage et de refroidissement des bâtiments à toit non isolé, mais que les besoins en énergie de chauffage et de refroidissement ne réduisaient pas beaucoup dans les bâtiments où une couche isolante de 50 mm est également appliquée sur le toit. La même conclusion a été obtenue lorsque les résultats des températures de l'air intérieur dans des conditions de flottement libre ont été extraits pendant des jours de charges thermiques maximales (Kokogiannakis, Georgios, Jo Darkwa, 2012).

La recherche « Evaluation de l'efficacité de rafraîchissement passif d'une toiture végétale à Constantine, Algérie, mené par ABDERREZAK Adjel, université de Constantine » a montré que les résultats d'une journée type de mois de Juin prouvent que la toiture végétale peut être considéré comme stratégie de rafraîchissement passif des bâtiments (et ce, sans ventilation). La toiture végétale a diminué considérablement les températures de l'air mesurées à 1.2 m du plancher de la chambre 02 par rapport à la chambre 01, tout au long de la journée. On note une baisse moyenne par rapport à la chambre 01 de 1.5 °C.

Tableau 1 : Récapitulatif sur les recherches relatives à l'impact des toits végétalisés sur le confort thermique des bâtiments à travers le monde :

Climat	Ville	Outils de simulation	Apport de la toiture végétalisée sur le confort thermique
Continental humide	Ottawa (Canada)	Mesurer sur place par Source : www.nrc-cnrc.gc.ca	Les fluctuations de température journalières médianes dans la membrane du toit vert ont chuté de 46 °C (mesurées sur la membrane du toit témoin) à 6 °C, atténuant considérablement les contraintes thermiques exercées sur la membrane et contribuant éventuellement à prolonger la durée de vie de celle-ci.
Subtropical humide	Ningbo (Chine)	Simulation par le logiciel ESP-r Source : G. Kokogiannakis et al, 2014	_les températures intérieures dans la salle de conférence pourraient augmenter de plus de 3 ° C pendant la période de pointe du chauffage après l'application du toit vert spécifique sur un toit non isolé. _des améliorations mineures de la température de l'air intérieur ont été constatées lorsque le toit vert a été appliqué sur un toit isolé.
Semi-aride	Constantine (Algérie)	Mesure sur place par des instruments techniques Source : ABDERREZAK Adjel, 2010	_La toiture végétale a diminué considérablement les températures de l'air mesurées à 1.2 m du plancher de la chambre 02 par rapport à la chambre 01, tout au long de la journée. _On note une baisse moyenne par rapport à la chambre 01 de 1.5 °C.
Méditerranéen	France	Source : Ernst & Young et Associés, 2009	Avec un arrosage suffisant, on obtient ainsi un impact très important en journée (-1 à 3 °C).
Maritime tempéré	Cardiff, Royaume-Uni	Simulation Thermique Dynamique	Le jour : -Réduction des pics de température de 3 à 5°C. -Réduction des gains thermique de 40%.

		(ECOTECT TRNSYS 17) Source : N. HILTEN Roger, 2005	La nuit : -Des températures 3 à 5°C de plus que pour la référence. -Réduction des déperditions thermiques de 80%.
Subtropical humide	Kobe, Japon	Les calculs de test de Laboratoire National Lawrence Berkeley et le laboratoire national d'Oak Ridge Source : ATik. A, 2011	En août, le degré de température de surface du ciment, de la dalle en béton et de la peinture grise très réfléchissante est presque le même et plus haut d'environ 10 ° c que celui sur les surfaces avec des peintures blanches et vertes très réfléchissantes. La température sur la surface verte est inférieure de plusieurs degrés que celui sur sol nu, et il est plusieurs degrés plus haut que sur la peinture blanche hautement réfléchissante.
Méditerranéen	Athènes, Grèce	Un modèle de simulation basé sur des formules mathématiques développé par les chercheurs Alexandri E, Jones P Source : Alexandri E, Jones P, 2007	La toiture verte permet des diminutions de température de 26.2°C pour la maximale et 14.4°C pour la moyenne journalière par rapport à une toiture en béton. Le confort thermique s'étend de la perception thermique « légèrement frais » à la zone « doux ».
Chaud et aride	Arizona, USA	Le programme MRT ²	Une haute de la valeur de la MRT, ce qui est à l'origine d'une température effective ET au-dessus de la zone de confort. Les résultats ont montré que les conditions météo logique affectent l'utilisation de ces emplacements, d'où le constat des conditions inconfortables engendrées par la situation de surchauffe arrivant jusqu'à environ 10 heures durant la journée.

Les études qui se rapportent au climat méditerranéen ont été réalisés dans la rive nord de la méditerranée, tel qu'Athènes en Grèce (Spala, A., H. S. Bagiorgas, M. N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos, 2008) , et à l'ouest des états unis d'Amérique en Californie (Sproul, Julian, Man Pun Wan, Benjamin H. Mandel, 2014).

En Afrique du nord , nous retrouvons des études qui concernent la réduction de la consommation d'énergie à travers les toitures vertes pour des villes connaissant le climat semi-aride telle que Constantine en Algérie (ABDERRAZAK Adjiel, 2010) et Le Caire en

² MRT est un programme informatique développé par Dr. Chalfoun en 1991 qui peut être employé pour prévoir les températures de surfaces basées sur des données de l'année météorologique.

العنوان: Impact des toitures végétalisées sur la consommation énergétique des bâtiments sous un climat méditerranéen
اسم المؤلف: TELLACHE Asmaa
Egypte (Kamel, Basil, Sherine Wahba, Khaled Nassar, 2012); (Fahmy, Mohammad, Hany El-Hady, Mohamed Mahdy, 2017).

De plus, ces études ont été réalisées pour de l'habitat, tandis que pour Boumerdes elle concerne un équipement éducatif (Lycée)

D'autres travaux concernant l'apport des toitures végétalisées ont été réalisées en Algérie, ils ont été réalisés par rapport à :

- Réduction des températures de surface au-dessus, et dessous des toitures végétalisées, Jijel, Climat méditerranéen (Bouchair, Ammar, Hocine Tebbouche, A. Hammouni, M. C. Lehtihet, 2014).
- Réduction de l'îlot de chaleur urbain , simulation Envi met; Constantine, Climat semi-aride (Sahnoune, Sara, 2017).

Dans ce travail, nous nous intéressons aux questions relatives aux toits végétaux, par rapport à leurs effets sur la régulation du microclimat urbain dans les villes côtières méditerranéennes, et à leurs impacts en termes d'isolation, de confort thermique et de consommation énergétique à l'intérieur du bâti ; et ce pour le contexte local de la ville de Boumerdes.

1. Méthodologie de travail

Dans cette étude, l'investigation concerne la comparaison de la consommation énergétique en chauffage, en refroidissement et en ventilation, mesurées par le logiciel ArchiWizard une fois sur le bâtiment tel qu'il (le lycée Frantz Fanon à Boumerdes) est et une fois en rajoutant une toiture verte. Et ce, afin d'évaluer la capacité d'améliorer le confort thermique et la performance énergétique par toit végétal sous le climat méditerranéen de Boumerdes.

1.1 Analyse climatique de la ville

Boumerdès, anciennement *Rocher Noir* pendant la colonisation française, est la commune de chef-lieu de la wilaya de Boumerdès, elle est le chef-lieu, située à 45km à l'est d'Alger et à 52 km à l'ouest de Tizi Ouzou.

Elle se situe entre la latitude 36.75°Nord et la longitude : 3.483°EST. Le centre-ville s'étale sur un terrain caractérisé par une topographie peu accidenté sur une altitude : 156m.

Boumerdès est une ville côtière du centre du pays et s'étend sur une superficie de 19.08km² avec environ 5.8km de profil littoral.



Figure 1: Situation de la ville de Boumerdes (www.over-blog.com, 2019)

Le climat de Boumerdès est chaud et tempéré. En hiver, les pluies sont bien plus importantes à Boumerdès qu'elles ne le sont en été. Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat est de type méditerranéen maritime. Boumerdès affiche une température annuelle moyenne de 18.0 °C. Sur l'année, la précipitation moyenne est de 739 mm (Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires, 2017). Une analyse climatique a été faite à partir du logiciel météo-norme 7.2 sur la climatologie de la ville.

Tableau 2: Tableau climatique Boumerdes

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	11.2	11.7	13.7	15.7	18.8	22.3	25.3	26.3	23.9	19.8	15.5	12.3
Température minimale moyenne (°C)	6.8	7.3	9.2	11	14	17.4	19.9	20.8	19.4	15.3	11.3	7.8
Température maximale (°C)	15.7	16.2	18.3	20.5	23.6	27.2	30.8	31.9	28.4	24.4	19.7	16.8
Précipitations (mm)	108	84	74	60	41	17	2	4	37	76	106	130

Source : Météo-norme 7.2 traitée par l'auteur, 2022

Le site de Boumerdes est Humide

- La période connaissant la précipitation la plus importante (80mm par mois) est celle des mois de Décembre et janvier.
- Entre février et avril, la précipitation enregistrée est de 45mm par mois.
- Les autres mois représentent la période chaude, la moyenne de précipitation est de 20mm par mois.

L'amplitude des précipitations entre le mois le plus sec, et le mois le plus humide, est de 128 mm. Pour la différence en température, entre la plus basse et la plus élevée de l'année, est de 15.1 °C.

1.2 La consommation énergétique au niveau national et local (Boumerdes)

La consommation en énergie électrique des communes ne cesse d'augmenter d'année en année, tant en physique qu'en financier. En 2017, la consommation a atteint 4 801 GWhs, soit 8% de la consommation nationale en énergie électrique de 59 423,7GWh, pour un montant correspondant à 27 milliards de dinars (SONALGAZ, 2018). (voir tableau 3)

La rationalisation de la consommation de l'énergie électrique devient, donc une urgence pour réduire l'impact de la facture d'énergie sur les budgets des communes.

La consommation énergétique sur la commune de Boumerdès est estimée à 402 GWhs EF/an en 2014, soit environ 7,4 MWh EF/an/habitant (équivalent environ à 5 barils de pétrole par an par habitant) (Menouer BOUGHEDAOU, 2015). Elle se répartit comme suit entre les secteurs étudiés : (voir figure 2)

On note une forte présence de gaz naturel dans les consommations du résidentiel, moins prégnante pour le tertiaire.

Tableau 3: Consommation de l'énergie électrique des communes par wilaya

Wilaya	Consommation (GWh)	Montant TTC (MDA)	Wilaya	Consommation (GWh)	Montant TTC (MDA)	Wilaya	Consommation (GWh)	Montant TTC (MDA)
Alger	1 560,00	7 466,00	Blida	80,34	391,58	Bouira	46,89	302,61
SETIF	202,00	1 228,00	TIARET	75,89	468,13	JUJEL	43,29	286,65
MOSTAGANEM	163,96	788,97	CONSTANTINE	74,77	442,40	Tipaza	41,12	265,32
ORAN	143,38	781,73	BBA	73,08	416,26	GUELMA	40,33	266,21
ADRAR	141,18	787,51	MASCARA	72,43	410,22	KHENCHELA	38,12	284,32
M'SILA	127,20	801,88	Tizi Ouzou	70,86	460,66	AIN TEMOUCHENT	37,50	241,66
El Oued	122,33	647,28	SKIKDA	70,14	445,60	BECHAR	35,50	222,73
BEJAIA	119,22	713,51	Médéa	63,25	397,85	SOUK AHRAS	32,20	223,20
TLEMCEEN	104,21	669,59	MILA	62,25	398,71	Boumerdes	28,88	175,16
Biskra	102,70	603,41	DD GHARDAIA	58,87	377,64	Laghouat	26,27	170,29
ANNABA	97,94	446,11	TEBESSA	56,50	315,14	EL BAYADH	26,00	169,74
CHLEF	97,75	541,44	OEB	54,85	365,03	NAAMA	22,74	134,04
BATNA	83,04	646,59	RELIZANE	54,79	351,65	TISSEMSILT	15,54	108,98
Ouargla	82,18	514,19	SAIDA	52,98	346,62	Tamanrasset	15,23	97,61
DJELFA	81,60	455,75	SIDI BEL ABBES	50,00	315,40	Illizi	14,89	89,94
AIN DEFLA	81,05	486,76	EL TAREF	49,97	260,04	TINDOUF	5,62	36,51
Blida	80,34	391,58				Total	4 800,82	26 816,59

Source : SONALGAZ, 2018

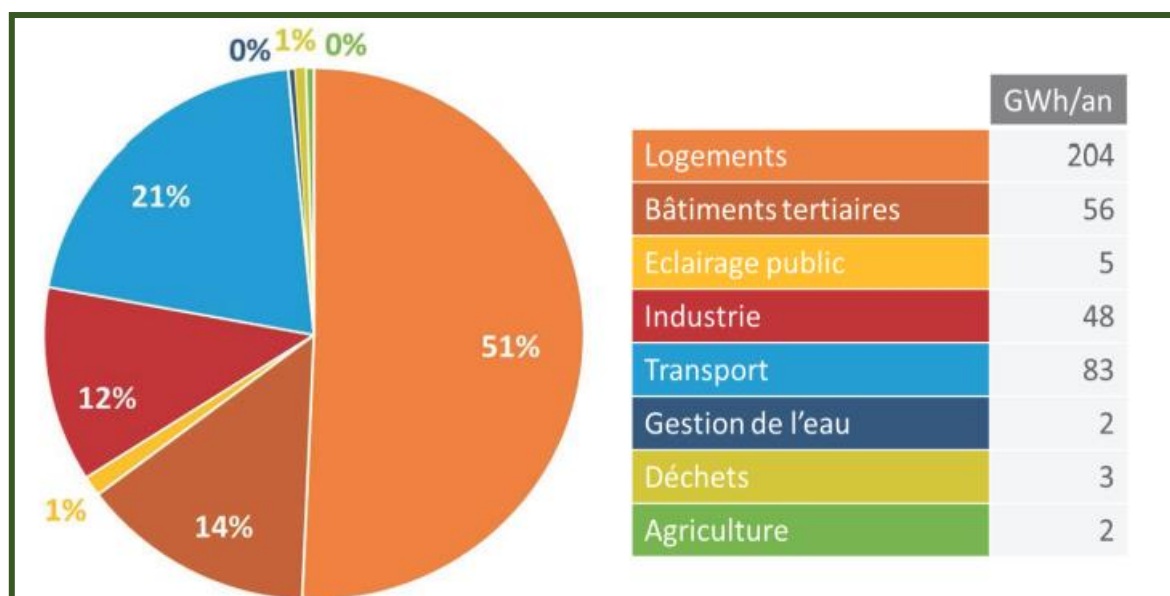


Figure 2: Consommation d'énergie à Boumerdes (Menouer BOUGHEDAUI, 2015)

La consommation de l'industrie restera à confirmer à l'échelle locale, car le nombre affiché d'entités industrielles pourrait être principalement des sièges administratifs d'industrie. De surcroît, la valeur des consommations du transport apparaît relativement faible, alors que la mobilité des habitants du territoire est importante (du fait de la proximité d'Alger). Les émissions de GES sur la commune de Boumerdès sont estimées à 159 k teqCO₂/an en 2014, soit environ 2,9 teqCO₂/an/habitant (équivalent environ à 18000 km en voiture). La différence avec les émissions moyennes par habitant en Algérie (3,3 teqCO₂/an/hab.) est relativement faible, bien que les périmètres étudiés ne correspondent pas exactement.

Boumerdès est une destination touristique particulièrement prisée. C'est pourquoi, les consommations énergétiques et émissions de GES varient fortement en fonction des flux de populations. Lors de la période estivale, ce sont entre 6 et 7 millions de personnes qui se pressent chaque année sur les plages de Boumerdès. Ces touristes constituent une population temporaire qui contribue à accroître la consommation d'énergie et les émissions par leur

énergétique des bâtiments sous un climat méditerranéen déplacement, utilisation des services (restauration, hôtels, climatisation, éclairage des zones touristiques, etc.). La commune doit donc faire face pendant les deux mois d'été à un pic de consommation énergétique, plus difficile à mesurer dans le cadre de l'IRE.

1.3 Présentation du cas d'étude

Le lycée Frantz Fanon se situe sur la rue Mohamed El Mahdi, (quartier les 800 logements, Boumerdes) à 200 m de la mer.



Figure 3: Situation géographique du lycée Frantz fanon : (a)plan de situation, (b)plan de masse, (c) image réel (Google maps, 2022)

Il est délimité :

- Au Sud : par la protection civil Boumerdes
- Au Nord : par le siège de la radio de Boumerdes
- A l'Est : l'école primaire et l'annexe APC
- L'Ouest : par la cité police

L'établissement présente un intérêt très particulier de point de vue de sa situation géographique, sa fonction (établissement scolaire) et sa grandeur (capacité d'accueil : 576 lycéens). Il contient un bloc pédagogique en R+3 (avec 16 classes), un bloc administratif en R+1, un bloc d'hébergement pour filles et garçons en R+4, un bloc réfectoire et gymnase en R+1 et un bloc de logement d'astreinte en R+2.



Figure 4: Plan de masse du lycée Frantz Fanon, Boumerdes (Cabinet d'architecture Boudjemia, 2019)

Nous avons choisi de conduire cette recherche dans le centre-ville de Boumerdes, et plus précisément dans le lycée Frantz Fanon, au quartier les 800 logements dont l'importance se conjugue sur une échelle communale, d'où sa grandeur en termes de surface (8000 m²) mais aussi en nombre d'utilisateurs (576 lycéens). Cet établissement comporte des caractéristiques favorisant notre centre d'intérêt :

- Situation dans le centre-ville de Boumerdes, et proximité de la mer
- Disponibilité de la documentation relative à cet établissement (vu que l'équipement est récent, construction achevée en 2010)
- Le lycée est une véritable synthèse des types de structures existants dans les constructions de la ville de Boumerdes (poteau-poutres avec voiles de contreventement en béton armé).

1.3.1. Présentation des entités d'étude

Pour réaliser notre étude, nous devons choisir (dans la mesure du possible) des entités qui font l'objet d'une simulation par l'outil informatique. Le but de cette simulation est d'assurer le confort hygrothermique (le confort thermique plus la stabilité de l'humidité) du bâtiment. De ce fait, nous allons choisir des entités qui sont défavorables en termes de température et d'humidité.

- Le taux d'humidité est élevé durant la nuit, à cause des basses températures (orientation Nord), d'où le choix du bloc d'hébergement, dernier niveau (4^{ème}), chambre 01.

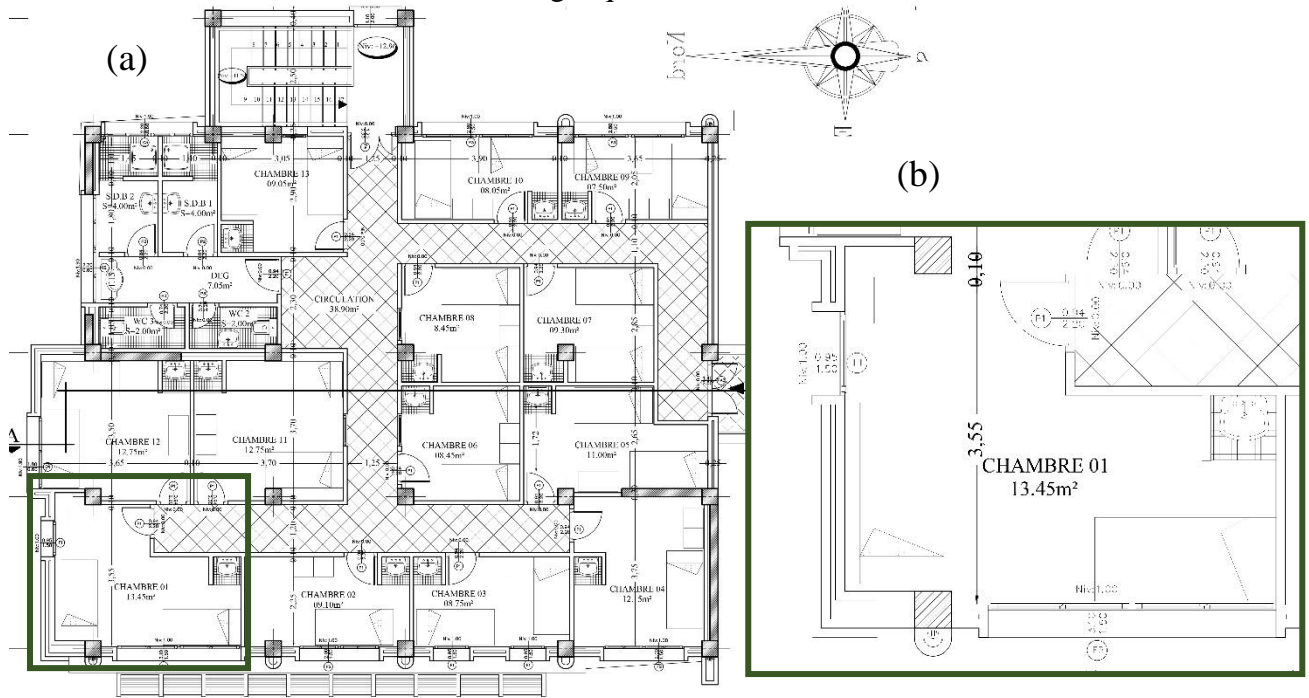


Figure 5: (a) : le bloc d'hébergement. (b) : la chambre 01 (Cabinet d'architecture Boudjemia, 2019)

- La température est élevée durant le jour en raison des hautes températures (orientation Sud/ Ouest), ce qui nous a conduit à choisir le bloc pédagogique, dernier niveau (3ème), classe 16.

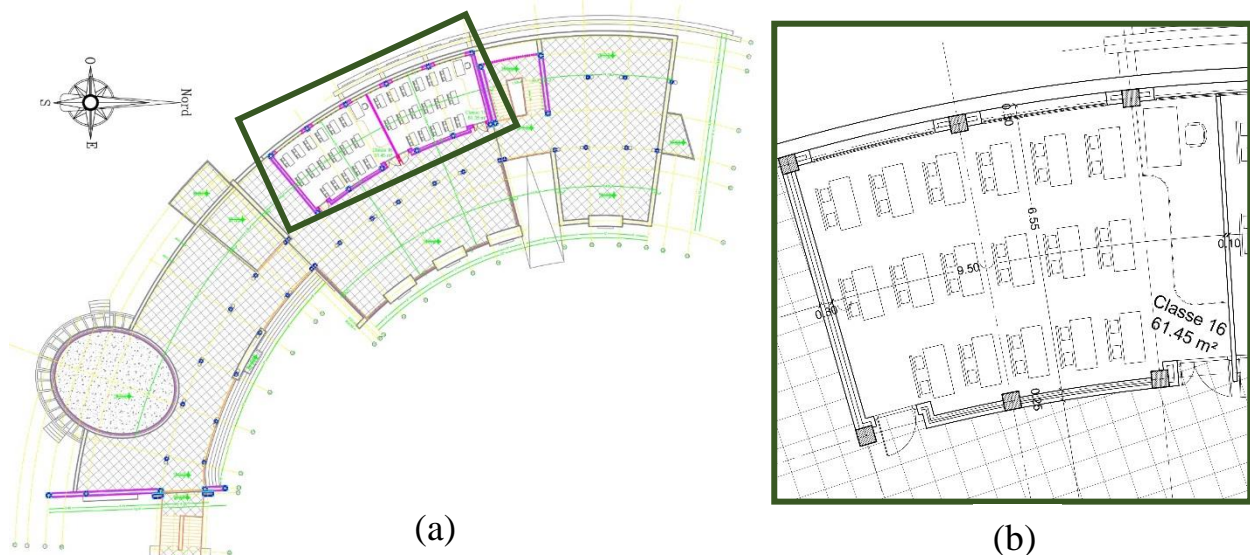



Figure 6: (a) : le bloc pédagogique : plan 3ème étage, (b) : la classe 16 (Cabinet d'architecture Boudjemia, 2019)

1.3.2. Caractéristiques des toitures des entités d'études

Pour les étages courants et la toiture, sont réalisés avec des plancher creux constitués d'une dalle de compression en béton armé, et d'hourdi (16+4cm) (voir figure 7 et tableau 4). Pour le système porteur, il est en poteau-poutre avec des voiles de contreventement. Le béton étant dosé à 350 MPa, suivant les normes du RPA 2003 (REGLEMENTAIRE & 48, 2003), concernant les constructions des ouvrages spéciaux notamment les structures éolières.

Tableau 4: Récapitulatif des composants des toitures témoins

Composants	Épaisseurs	Coupe schématique
Plâtre	2cm	
Hourdi	16cm	
Dalle en béton armé	4cm	
Isolation thermique (polystyrène)	4cm	
Forme de pente (béton léger dosé à 250 MP)	(14-5) =9cm	
Complexe d'étanchéité	9mm	
Gravier roulé	4cm	

1.4 Les composants de la toiture végétale

La présente toiture végétale expérimentale trouve son inspiration de la recherche d'Alexandrie et Jones (Alexandri, Eleftheria, 2007). A l'exemple de cette dernière, un socle en bois surélevé de quelques centimètres du plancher a été construit sur la surface totale de la chambre 01 (13.45 m²) et de la classe 16 (61.45m²). Vu que des interstices devaient être laissées afin de permettre l'évacuation de l'eau, la mise en place d'un grillage solide s'impose puisqu'il permet au substrat saturé, et garder la position horizontale. Un film en plastique transparent sera ensuite déposé sur le grillage, et percé de trous à plusieurs endroits permettant l'évacuation des eaux excédentaires vers le plancher, puis vers l'évacuation. Le substrat est ensuite déposé au-dessus de ce film. (Voir figure 8)

Le choix pour la présente toiture s'est porté sur la configuration monocouches, sachant que l'épaisseur de la couche de drainage est conditionnée par plusieurs éléments tels que : la pente du toit, les charges admissibles, les espèces végétales et la couche filtrante :

- **La couche filtrante :** l'épaisseur de la couche de drainage est coordonnée avec la présence ou l'absence de la couche filtrante. Cette dernière n'est pas obligatoire que lorsque l'épaisseur de la couche de culture représente plus de la moitié de celle de la couche de drainage (Lassalle, 2008). C'est-à-dire, lorsque la couche filtrante est supprimée (comme pour ce cas d'étude), le substrat doit avoir une épaisseur inférieure ou égale à la moitié de la couche de drainage (Lassalle, 2008). Donc, la prise en compte de cette condition dans ce cas d'étude, exige que la couche de drainage doive être plus importante que le substrat pour pouvoir éliminer la couche filtrante.
- **La pente :** la couche de drainage doit avoir une épaisseur de 4 à 6cm en pente nulle (Lassalle, 2008). Donc, dans ce cas d'étude, ou la pente de 2% est considéré comme nulle, le substrat doit être ≤ 2 ou ≤ 3 cm d'après les conditions reliées à la couche filtrante. Or, ces épaisseurs de substrat peuvent être considéré trop faible pour la survie des plantes et pour l'obtention d'un effet de rafraîchissement à l'intérieur du bâtiment sous un climat méditerranéen.
- **Le choix des végétaux :** les plantes succulentes peuvent se développer sur les plus faibles épaisseurs (4 à 8 cm), sans ou avec drainage, les plantes vivaces plus exigeantes sont installées sur des épaisseurs plus fortes (10 à 15 cm) et demandent une couche de drainage et une couche filtrante (Lassalle, 2008). Dans ce cas d'étude et vu le climat méditerranéen de Boumerdes, les plantes doivent obligatoirement être succulentes, et donc 4 à 8 cm de substrat sans drainage suffisent.

- **La surcharge admissible :** un substrat de 12 cm ou 15 cm d'épaisseur en végétalisation extensive, exige l'utilisation d'un drainage léger en argile expansé concassé, pouzzolane...

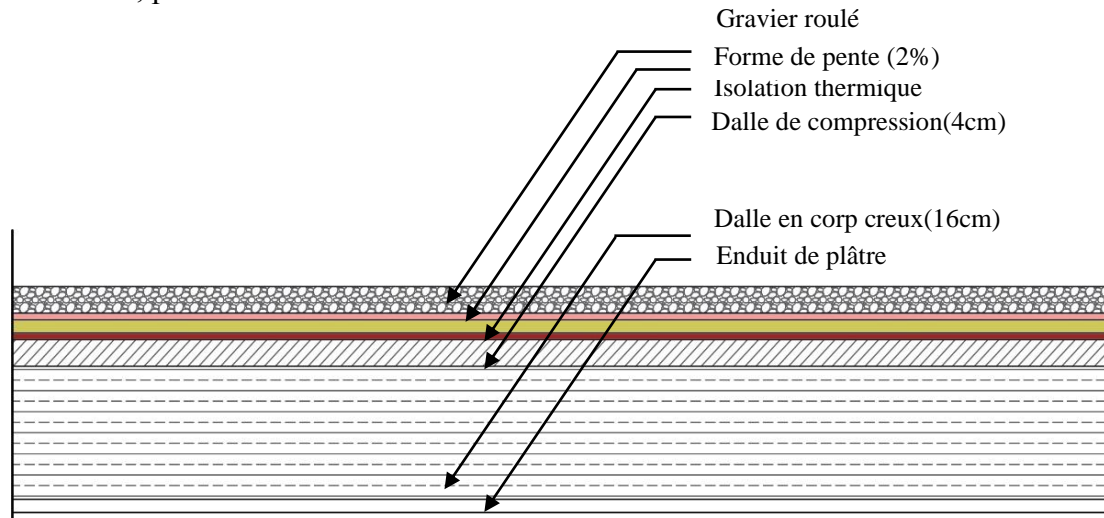


Figure 7: Coupe schématique sur le plancher de référence

Tous les paramètres cités plus hauts, ont guidé le choix vers une solution médiane, de façon à éliminer la couche filtrante et la couche de drainage, puisque leur absence ne sera pas néfaste pour les plantes succulentes, et donc la configuration monocouche a été choisie. (Voir figure 8)

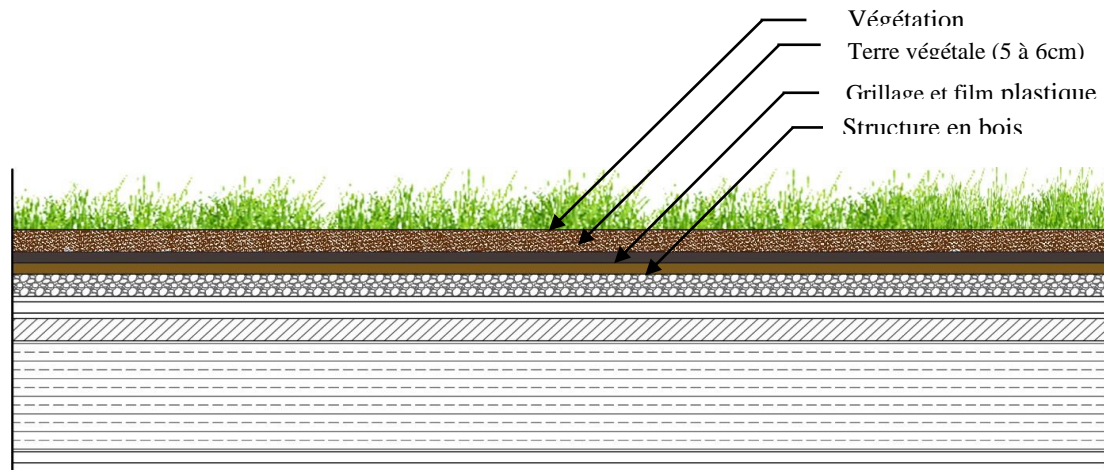


Figure 8: Coupe schématique sur le plancher avec toit vert

2. Interprétation des résultats

Dans le cadre de cette recherche, nous effectuons des simulations sur le bâtiment (le lycée Frantz fanon) afin d'évaluer les économies d'énergie réalisées par le toit végétal par le logiciel *ArchiWizard*. Ce logiciel va permettre d'étudier les variations du comportement hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment et les conséquences possibles, en termes de confort, sur la température des espaces intérieurs et la consommation énergétique (du cas général, de la chambre 01 et de la classe 16).

2.1.Cas général

Pour que la simulation soit éditée, un certain nombre de données d'entrée est nécessaire à prendre en considération.

- Les données météorologiques

- L'altitude
- La localisation géographique
- Le type d'usage du bâtiment
- Les coefficients de conductivité thermique de chaque matériau.

Après avoir enregistré toutes les données nécessaires, nous avons lancé la simulation de la performance thermique de tout le lycée (cas général) du scénario actuel (toit minéral), nous avons obtenu les résultats suivants : (voir tableau 5)

Tableau 5: Lycée-Besoins énergétiques du scénario actuel (toit minéral)

Besoins mensuels (kWh)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Chauffage	775601	573822	344389	278603	118378	31212	0	0	102406	196529	472595	867209	3760744
Refroidissement	0	0	164307	250998	448667	603542	673696	636048	382788	159444	21414	206	3341110
Eclairage	6865	5795	6252	5763	6210	5961	5969	6211	5748	6380	6534	6988	74677
Eau chaude sanitaire	383	328	354	328	313	273	242	230	240	279	306	352	3628
Ventilation	9258	8309	9258	8806	9258	8941	9122	9258	8806	9258	8941	9122	108336

Nous avons remarqué que les besoins de chauffage sont plus importants par rapport aux besoins de refroidissement., ce qui nous laisse considérer le site d'étude comme un site froid.

- Les mois ou on a besoin de chauffer sont : Novembre, Décembre, Janvier, Février.
- Les mois ou on a besoin de refroidir sont : Juin, Juillet, Aout
- Les mois ou on a besoin de refroidir pendant quelques jours et de chauffer pendant d'autres jours : Mars, Avril, Mai, Septembre.

Calcul du diagnostic de la performance énergétique du lycée selon la RTA

DPE= les besoins de chauffages+ les besoins de ventilation+ les besoins de refroidissement/la surfaces total.

$$DPE = \frac{3760744 + 3341110 + 108336}{8000}$$

$$DPE = 960 \text{ kwh/m}^2.\text{an}$$

Donc d'après la RT³ le lycée est de classe **G**

Après le diagnostic de l'état actuel du lycée, nous avons rajouté le toit vert (voir titre précédent) au lycée pour avoir les résultats suivants : (voir tableau 6 et figure 9).

Tableau 6: Lycée-Besoins énergétiques du scénario proposé (toit végétal)

Besoins mensuels (kWh)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Chauffage	180953	126663	42285	1917	0	0	0	0	0	0	95690	181879	629388
Refroidissement	0	0	27888	47325	146533	267454	295980	282966	128202	30091	442	0	1226880
Eclairage	13770	12003	12554	11741	11917	11263	11814	11976	11888	12893	13117	13977	148914
Eau chaude sanitaire	438	395	420	379	359	319	314	315	321	361	381	422	4425
Ventilation	36024	32538	36024	34862	36024	34862	36024	36024	34862	36024	34862	36024	424160

³ RT : C'est une norme qui permet de réglementer et d'encadrer les bâtiments neufs et de montrer leur consommation énergétique maximale. La réglementation thermique en vigueur la RT 2022.

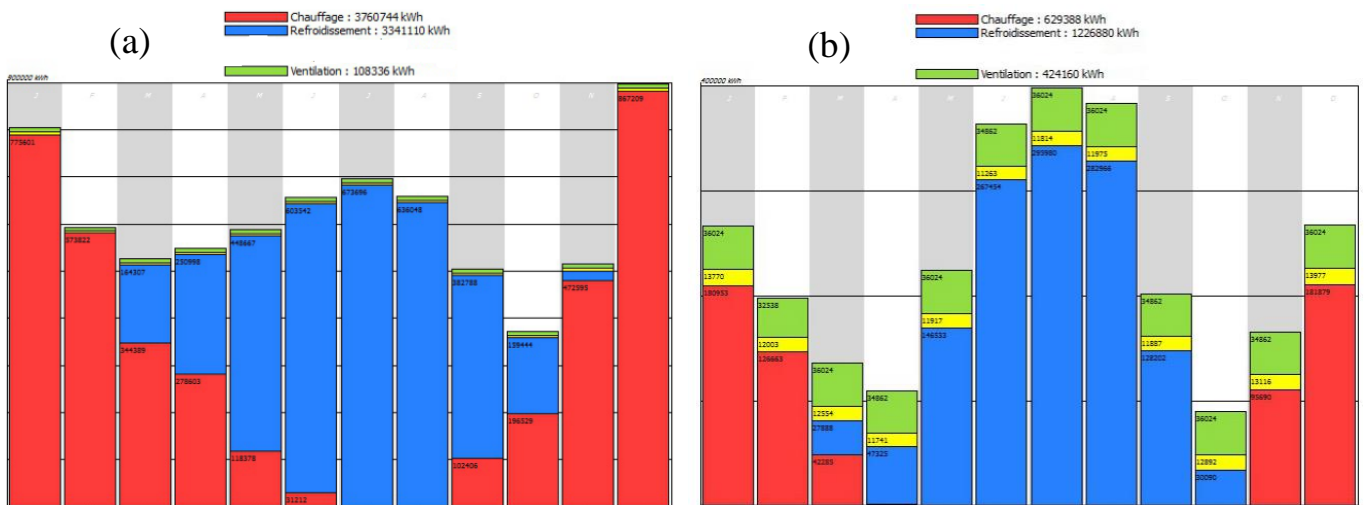


Figure 9 : Lycée-Besoins énergétiques du : (a) scénario actuel (toit minéral), (b) : scénario proposé (toit vert)

Nous avons remarqué que les besoins énergétiques ont diminué de **68.3%**

- Les besoins de chauffage ont diminué de 83.2%
- Les besoins de refroidissement ont diminué de 63.3%
- Les besoins de ventilation ont augmenté de 291.5%

Calcul du diagnostic de la performance énergétique du lycée selon la RTA⁴

$$DPE = \frac{629388 + 1226880 + 424160}{8000}$$

$$DPE = 285 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$$

Donc le lycée est de classe **D**

Le lycée est passé de la classe G à la classe D grâce à la toiture verte

2.2. Cas de la classe

Nous avons lancé la simulation de la performance thermique de la classe 16 du bloc pédagogique (orienté Sud-Ouest) du scénario actuel (toit minéral), les résultats obtenus sont (voir tableau 7) :

Tableau 7: Classe 16-Besoins énergétiques du scénario actuel (toit minéral)

Besoins mensuels (kWh)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Chauffage	148	110	82	42	17	0	0	0	0	2	126	120	647
Refroidissement	0	0	0	0	0	34	2	9	0	0	0	0	45
Eclairage	6	4	6	2	3	2	0	0	4	5	8	5	45
Eau chaude sanitaire	141	121	198	92	176	148	0	0	142	138	186	135	1476
Ventilation	21	18	31	15	32	29	0	0	28	25	31	21	252

On remarque que :

⁴ RTA : Réglementation Thermique Algérienne

- Les mois ou on a besoin de chauffer sont : Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars
- Les mois ou on a besoin de refroidir sont : Juin
- Juillet, Aout et Septembre : le lycée sera en vacances, donc on n'a pas besoin de refroidir

Après le diagnostic de l'état actuel de la classe 16, nous avons rajouté un toit vert a cette dernière :

Tableau 8: Classe 16-Besoins énergétiques du scénario proposé (toit végétal)

Besoins mensuels (kWh)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Chauffage	128	95	67	7	0	0	0	0	0	0	101	100	499
Refroidissement	0	0	0	0	0	34	1	8	0	0	0	0	44
Eclairage	6	4	6	2	3	2	0	0	4	5	8	5	45
Eau chaude sanitaire	141	121	198	92	176	148	0	0	142	138	186	135	1476
Ventilation	21	18	31	15	32	29	0	0	28	25	31	21	252

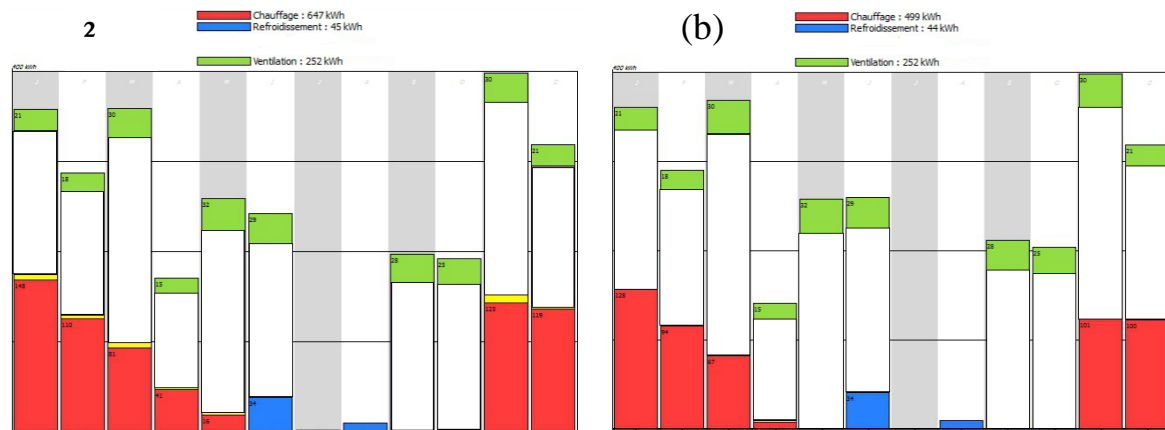


Figure 10: Classe 16-Besoins énergétiques du : (a) scénario actuel (toit minéral), (b) : scénario proposé (toit vert)

On remarque que :

- Les besoins de chauffage ont diminué de 22.9%
- Les besoins de refroidissement 2.3%
- Les besoins de ventilation ont resté stables

Pourquoi les besoins de refroidissement n'ont pas beaucoup diminué ?

La classe est orienté Sud/Ouest, le coté le plus chaud. De plus, la classe est composée de grandes baies avec un vitrage simple, ce qui provoque un effet serre à l'intérieur de la classe. Donc, on a toujours besoins de climatisation artificiel pour garder une température ambiante.

La toiture végétalisée n'a pas pu diminuer les besoins de climatisation, mais elle a pu diminuer les besoins de chauffage.

2.3.Cas de la chambre

Nous avons lancé la simulation de la performance thermique de la chambre 01 du bloc d'hébergement (orienté Nord) du scénario actuel (toit minéral), les résultats obtenus sont :

Tableau 9: Chambre 01-Besoins énergétiques du scénario actuel (toit minéral)

Besoins mensuels (kWh)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Chauffage	625	542	350	254	96	25	1	0	36	143	467	618	3156
Refroidissement	0	0	0	0	0	27	45	83	22	0	0	0	177
Eclairage	14	10	9	6	5	4	4	6	7	9	13	14	100
Eau chaude sanitaire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Ventilation	40	36	40	39	40	39	40	40	39	40	39	40	472

Nous remarquons que la chambre a des besoins de chauffage plus importants que des besoins de refroidissement.

La chambre a besoin de se chauffer en : Janvier, Février, Mars, Avril, Mai, Octobre, Novembre, Décembre.

La chambre a besoin de se refroidir en : Juin, Juillet, Aout

Le diagnostic des performances énergétiques de la chambre selon la RTA

DPE= les besoins de chauffages+ les besoins de ventilation+ les besoins de refroidissement/la surfaces totales

$$DPE = 3156 + 177 + 472 / 13.45$$

$$DPE = 282 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$$

Donc la chambre est de classe **E**

Après le diagnostic de l'état actuel de la chambre 01, nous avons rajouté un toit vert a cette dernière :

Tableau 10: Chambre 01-Besoins énergétiques du scénario proposé (toit végétal)

Besoins mensuels (kWh)	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Chauffage	303	265	156	111	34	3	0	0	0	44	212	294	1422
Refroidissement	0	0	0	0	0	0	27	52	12	0	0	0	92
Eclairage	14	10	9	6	5	4	4	6	7	9	13	14	100
Eau chaude sanitaire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Ventilation	40	36	40	39	40	39	40	40	39	40	39	40	472

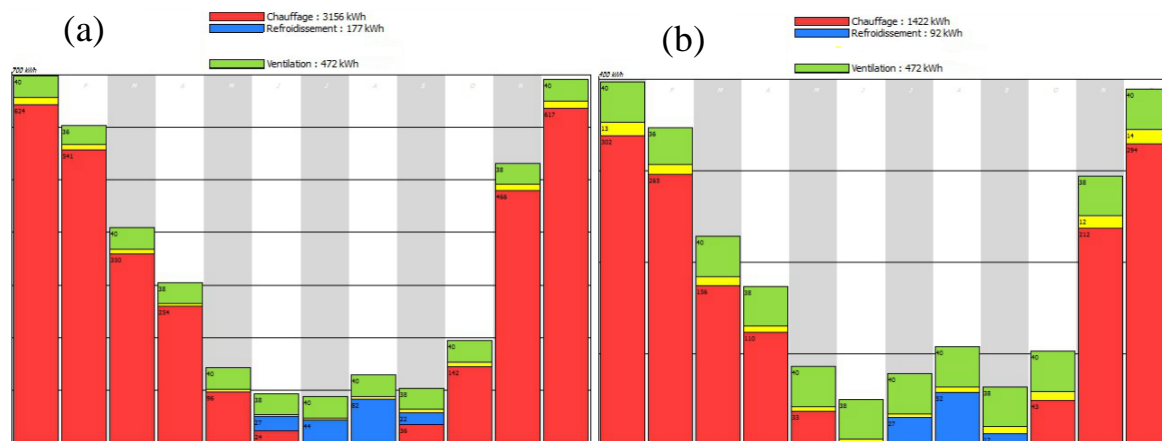


Figure 11:Chambre 01-Besoins énergétiques du : (a) scénario actuel (toit minéral), (b) scénario proposé (toit vert)

On remarque que :

- Les besoins de chauffage ont diminué de 55%
- Les besoins de refroidissement 48%
- Les besoins de ventilation sont restés stables

Le classement de la chambre 01 (avec toit vert) selon la RT

DEP= 1422+92+472/13.45

DEP=150 kwh/m².an

Donc le lycée est de classe C

La chambre est passée de la classe E à la classe C (la zone du confort thermique) grâce à la toiture verte.

3. Conclusion

La présente investigation est basée sur la comparaison des besoins énergétiques mesurées dans une entité d'étude sans toit végétal (cas général, chambre 01 et classe 16) et avec toit végétal. Les résultats trouvés ont confirmé les hypothèses concernant l'importance de la protection des parois horizontales des radiations solaires qui génèrent des surchauffes incontournables dans le bâtiment en été sous le climat méditerranéen de Boumerdes.

En effet, la toiture végétale, dotée d'une fine couche de substrat, et faiblement recouverte d'espèces succulentes, a pu diminuer les besoins de climatisation passivement des entités d'études durant la saison estival. Aussi elle a pu faire diminuer les besoins de chauffage durant la saison hivernal. Il s'avère que la température de l'air intérieur est en fonction de plusieurs paramètres, dont l'interrelation conditionne le comportement thermique de la toiture verte est son efficacité.

Il est cependant important à signaler que c'est le substrat qui procure la plus importante protection de la surface externe du toit (vu la faible couverture foliaire de la toiture testée), grâce à son inertie et son capacité thermique qui amortissent le transfert de chaleur vers l'intérieur.

De ce fait, à travers les résultats de cette recherche, il est tout aussi important de prendre en considération dans les années à venir la possibilité de verdir les toits par le système extensifs sous le climat méditerranéen de Boumerdes. Ce verdissement, permettra non seulement d'agrémenter les espaces urbains, d'harmoniser et d'intégrer les bâtiments dans leurs environnements, de rajouter des surfaces végétales et de purifier l'air grâce à la photosynthèse. Toutefois, c'est surtout sa performance en tant que stratégie écologique qui est mise en avant à travers la présente recherche, puisqu'elle s'avère être très efficace pour le rafraîchissement passif des bâtiments, et l'économie d'énergie en chauffage et en climatisation.

Liste des abréviations

DEP : Diagnostic de la Performance Energétique

DTR : Document Technique Réglementaire

Bibliographie

- [1]. ABDERRAZAK Adjel. (2010). *Evaluation de l'efficacité d'un rafraîchissement passif d'une toiture végétalisée sous un climat semi-aride*. université de Constantine.
- [2]. Alexandri, Eleftheria, and P. J. (2007). Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. *Building and Environment* 42.8, pp. 2835-2849.
- [3]. Benhalilou, K. (2008). *Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival du bâtiment. Cas du climat semi-aride*.
- [4]. Bouchair, Ammar, Hocine Tebbouche, A. Hammouni, M. C. Lehtihet, and M. B. (2014). Compact cities as a response to the challenging local environmental constraints in hot arid lands of Algeria. *Energy Procedia* 42, pp. 493–502.
- [5]. d'Azur, N. C. (2009). *ETUDE POUR LA DEFINITION D'UNE DEMARCHE DE DEVELOPPEMENT DES TOITURES VEGETALISEES*.
- [6]. Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires. (2017). *Annuaire statistique de la wilaya de Boumerdes*. Boumerdes.
- [7]. Fahmy, Mohammad, Hany El-Hady, Mohamed Mahdy, and M. F. A. (2017). On the green adaptation of urban developments in Egypt; predicting community future energy efficiency using coupled outdoor-indoor simulations. *Energy and Buildings* 153, pp. 241–261.
- [8]. Kamel, Basil, Sherine Wahba, Khaled Nassar, and A. A. (2012). Effectiveness of green-roof on reducing energy consumption through simulation program for a residential building: Cairo, Egypt. *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*, pp. 1740–1749.
- [9]. Kokogiannakis, Georgios, Jo Darkwa, and K. Y. (2012). Simulating the energy performance of green roofs for Ningbo's climate.
- [10]. Laafer, A. (2021). *Contribution a La Simulation Des Charges Thermiques Dans Un Habitat à Plancher Chauffant*. Université « SAAD DAHLAB » de BLIDA 01.
- [11]. Lassalle, F. (2008). *Végétalisation extensive des terrasses et toitures: guide technique: conception et mise en oeuvre, aspects réglementaires, données économiques, exigences et solutions* (Moniteur).
- [12]. Menouer BOUGHEDAOU. (2015). *Algérie Commune de Boumerdes Plan d'action en faveur de l'énergie durable (PAED)*. Boumerdes.
- [13]. REGLEMENTAIRE, D. T., & 48, D. B. C. 2. (2003). *REGLES PARASISMiques ALGERIENNES RPA 99 / VERSION 2003*. Alger.
- [14]. Sahnoune, Sara, and N. B. (2017). Quantifying the impact of green-roofs on urban heat island mitigation. *International Journal of Environmental Science and Development* 8, No. 2, p. 116.
- [15]. SONALGAZ. (2018). *Présentation du modèle de consommation énergétique au niveau des communes*. Alger.
- [16]. Spala, A., H. S. Bagiorgas, M. N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos, and G. M. (2008). On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renewable Energy* 33, No. 1, pp. 173–177.
- [17]. Sproul, Julian, Man Pun Wan, Benjamin H. Mandel, and A. H. R. (2014). Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. *Energy and Buildings* 71, pp. 20–27.
- [18]. Tarik, A. (2011). *LES TOITURES VEGETALISEES A ALGER POUR UNE CONTRIBUTION A L'AMÉLIORATION DU MICROCLIMAT URBAIN MÉDITERRANÉEN*. Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme.