



HAL
open science

DÉFINITION DE POTENTIELS D'UTILISATION DE RESSOURCES BIOCLIMATIQUES POUR LE RAFRAÎCHISSEMENT DES BÂTIMENTS EN CLIMAT CHAUD ET HUMIDE

Abdou Idris, Joseph Virgone, Damien David, Étienne Vergnault, Abdoukader
Ibrahim

► **To cite this version:**

Abdou Idris, Joseph Virgone, Damien David, Étienne Vergnault, Abdoukader Ibrahim. DÉFINITION DE POTENTIELS D'UTILISATION DE RESSOURCES BIOCLIMATIQUES POUR LE RAFRAÎCHISSEMENT DES BÂTIMENTS EN CLIMAT CHAUD ET HUMIDE. IBPSA France 2018, May 2018, Bordeaux, France. hal-01849044

HAL Id: hal-01849044

<https://hal.science/hal-01849044>

Submitted on 25 Jul 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DÉFINITION DE POTENTIELS D'UTILISATION DE RESSOURCES BIOCLIMATIQUES POUR LE RAFRAÎCHISSEMENT DES BÂTIMENTS EN CLIMAT CHAUD ET HUMIDE

Abdou Idris*¹, Joseph Virgone¹, Damien David¹, Etienne Vergnault¹, Abdoukader Ibrahim²

¹ Université de Lyon, CNRS, Université Lyon 1, INSA-Lyon, CETHIL UMR 5008, Villeurbanne, France

² Université de Djibouti, Faculté d'Ingénieurs, GRE, Djibouti, Djibouti

Adresse de l'entité,

*abdou.idris-omar@etu.univ-lyon1.fr ou eleyeh.abdou@gmail.com

RESUME. Dans les pays chauds, le défi à relever est celui de la climatisation. L'augmentation de la consommation d'énergie par la climatisation découle du besoin de vivre dans des pièces plus confortables, ce qui est compréhensible. Mais à Djibouti, ce besoin est exacerbé par une architecture voulant imiter celle des pays développés mais inadaptée aux conditions climatiques. Cet article tente de proposer une nouvelle définition de potentiels d'utilisation de ressources bioclimatiques permettant le rafraîchissement des bâtiments situés sous ce type de climat. Pour ce faire, cela passe par une bonne connaissance des ressources énergétiques disponibles dans l'environnement, et plus particulièrement de leur utilité au regard des besoins de rafraîchissement du bâtiment. Dans le cadre de notre contribution à cette problématique, une première étape d'identification a été effectuée pour déterminer les ressources énergétiques à exploiter. Ensuite, des indicateurs ont été définis afin de quantifier la capacité des sources précédentes à couvrir la consommation d'énergie pour la climatisation et la possibilité pour le bâtiment de les exploiter. Dans ce travail, les indicateurs précédents ont été appliqués sur un cas de bâtiment type à Djibouti avec un climat type chaud et humide.

MOTS-CLÉS : Ressources énergétiques, Performance bioclimatique, Enveloppe du bâtiment.

ABSTRACT. In hot countries, the challenge is air conditioning. The increase in energy consumption by air conditioning stems from the need to live in more comfortable rooms, which is understandable. But in countries like Djibouti, this need is exacerbated by an unsuitable architectural design of the buildings for local climatic conditions. This paper proposes a new methodology for the quantification of the potential benefits of bioclimatic resources to reduce building's energy consumption, under hot and humid climate. To do so, it requires a good knowledge of the environmental resources, and especially their usefulness for building's cooling demand. As part of our contribution to this issue, first identification step has been carried out to determine which sources should be exploited. Then, indicators have been defined to quantify the ability of the previous sources to cover the need for air conditioning and the possibility for the building to exploit them. In this study, the previous indicators were applied to a reference building in Djibouti with a hot and humid conditions

KEYWORDS: Environmental resources, Bioclimatic performance, building envelope

1. INTRODUCTION

Dans les pays en voie de développement, le taux d'urbanisation jusqu'à là, faible augmente rapidement et les besoins en nouveaux bâtiments sont élevés. Selon l'ONU-HABITAT, le taux de

croissance des villes passera de 47% en 2011 à 65% à l'horizon 2050. Les pays en Afrique subsaharienne sont actuellement confrontés à la nécessité d'accroître leur production d'énergie pour accélérer le développement et améliorer le niveau de vie de leurs populations, dans un contexte de changement climatique et de flambée des coûts des énergies fossiles. A Djibouti, les ressources énergétiques sont très limitées et les ressources renouvelables abondantes sont faiblement exploitées, en dehors de l'énergie hydraulique importée de l'Éthiopie. Le coût de l'électricité y est très cher et la production est insuffisante pour répondre aux besoins du pays en électricité. Il y a, donc, une nécessité d'adopter une démarche bioclimatique et adapter le secteur du bâtiment au contexte climatique de la région afin d'offrir un environnement intérieur confortable et de réduire la consommation énergétique. En effet, c'est dans des conditions de faiblesses technologiques que le climat joue le rôle principal dans les solutions utilisées bien que, les solutions soient limitées lorsque les conditions climatiques sont extrêmes. Le principe de la démarche bioclimatique repose sur l'utilisation de l'enveloppe du bâtiment pour exploiter les ressources énergétiques de l'environnement. Plusieurs systèmes bioclimatiques ont été développés, pour les pays du climat chaud et humide, afin de profiter des différentes ressources énergétiques environnementales quand elles sont sources de fraîcheur et de s'en protéger lorsqu'elles sont source d'apport de chaleur. Par exemple, les principes bioclimatiques dans les pays chauds recommandent l'utilisation des dispositifs de protection solaire afin de protéger un bâtiment contre le rayonnement solaire. Les éléments tels que les pare-soleils (Butera, Adhikari, et Aste 2015) et les vitrages angulairement sélectifs ou adaptatifs (Smith, Dligatch, et Jahan 1998) et (Granqvist et al. 2010), peuvent être utilisés sur les fenêtres. La quantité de rayonnement absorbée par le bâtiment peut également être contrôlée grâce à l'utilisation de la double peau (Omar et al. 2017) qui s'appuie sur l'effet d'une première couche qui sert de protection contre le rayonnement solaire et la ventilation d'air entre les deux peaux pour évacuer la chaleur. Le rafraîchissement via le ciel, est également visé par la démarche bioclimatique dans les pays où les besoins de refroidissement sont importants. En effet, les échanges radiatifs nocturnes vers la voûte céleste peuvent être utilisés pour concevoir des capteurs de fraîcheur pour refroidir les surfaces des bâtiments, en particulier dans les pays chaud et humide où les différences de température entre le jour et la nuit sont faibles, (Molina, Erell, et Yannas 2013) et leur système « skytherms » ou le capteur de Givoni (Givoni 1994) sous lequel on fait passer l'air de ventilation. D'autres techniques, telles que la ventilation naturelle, peut être utilisée pour réduire les besoins de refroidissement (Butera, Adhikari, et Aste 2015), (Aflaki et al. 2015), (Elshafei et al. 2017) et le sol (Benhammou et Draoui 2015) et (Draoui et al. 2015).

Toutes ces technologies bioclimatiques ont rarement été évaluées en ce qui concerne la quantité d'énergie disponible qu'ils pourraient utiliser. Dans cette optique, cet article tente de proposer une méthodologie pouvant servir de base à une approche de la conception des bâtiments adaptée au climat chaud et humide. Elle est principalement basée sur la simulation, et permet d'évaluer la qualité énergétique de l'environnement d'un bâtiment et de mesurer la performance bioclimatique de ce bâtiment.

2. CONTEXTE HABITAT ET ANALYSE MÉTÉOROLOGIQUE

En Afrique de l'Est, les pays sont faiblement urbanisés, mais font face à un fort taux d'accroissement des aires urbaines. A Djibouti, en particulier, 77% de la population vit en zone urbaine et l'habitat est en pleine mutation. La construction à Djibouti est marquée par le passé colonial de la ville et est empreinte d'influences d'architecture yéménite et des villes arabes modernes, avec de

grands chantiers de construction omniprésents. La typologie du bâtiment à Djibouti est classiquement centrée sur le développement des deux secteurs : résidentiel et tertiaire. Le secteur résidentiel est généralement composé de types de bâtiments suivants (cf. Figure 1) (DISED 2015).

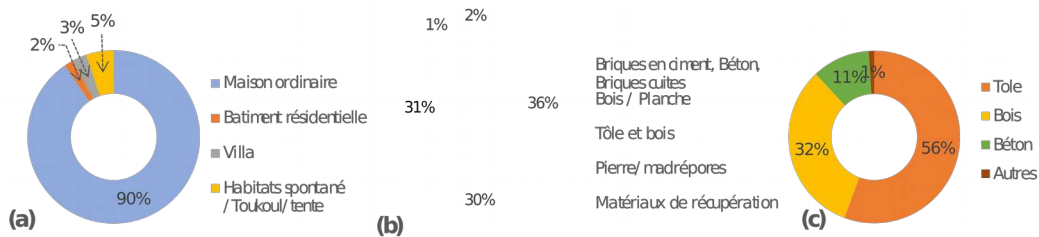


Figure 1 : (a) Typologies de construction à Djibouti, (b) Type de matériaux pour les murs (c) Nature des matériaux utilisés pour la toiture de la maison

Les moyens financiers limités conduisent une grande partie de la population à adopter la tôle tout en gardant une maçonnerie en matériau traditionnel (maison ordinaire) tel que la brique alvéolée de ciment communément appelée parpaing (Figure 1). Il peut être confectionné facilement sur le site de la construction, ce qui évite tout acheminement coûteux. Il est très résistant et apprécié pour sa facilité de pose. Ce mode de construction actuel, à Djibouti, offre beaucoup de potentiel d'amélioration de la performance énergétique du bâtiment. Cependant, les conditions climatiques sont extrêmes. Les pays avec un climat chaud et humide tel que Djibouti sont caractérisés par une pluviométrie très faible, un hiver chaud et humide et un été très chaud et humide (Dunham 1983) et (Kottek et al. 2006). La latitude de Djibouti place la ville dans une position où elle peut recevoir pratiquement le maximum de radiation solaire (des pics d'ensoleillement de plus de 800 W/m² presque toute l'année). Il en résulte une température élevée, en moyenne comprises entre 25°C et 34°C. Les maxima absolus peuvent parfois atteindre 46°C surtout en été et des amplitudes thermiques faibles sont garanties toute au long de l'année (une variation quotidienne de la température à peine égale à 5 ° C en été comme en hiver). Les plus faibles valeurs de l'humidité relative de l'air se situent pendant l'été, tandis que les plus fortes valeurs se rencontrent durant la saison fraîche où elles sont généralement supérieures à 70% pouvant être source d'inconfort. Mais globalement l'humidité de l'air reste supérieure à 30% toute l'année. Le pays est balayé par des vents dominants secs et brûlants (Khamsin) de direction Ouest en été et les alizés, vents humides de direction Est, durant la saison fraîche. La vitesse moyenne des vents est relativement faible (2 m/s). L'analyse du climat met en évidence deux périodes. Une première période, la saison fraîche, qui s'étend d'octobre ou de novembre à mars où le climat est plutôt agréable avec des températures moyennes comprises entre 22°C et 30°C. Une deuxième période, l'été, entre avril et septembre, avec des températures très élevées 30 à 35°C le matin, 40°C et plus en début d'après-midi. Du point de vue énergétique, ces conditions climatiques induisent des besoins spécifiques de rafraîchissement tout en posant des problèmes très difficiles à la recherche de source de rafraîchissement pour le bâtiment. La problématique du confort dans les bâtiments est donc l'un des enjeux principaux pour ce type de climat. Un bâtiment doit pouvoir s'adapter au mieux à ce climat, avec une architecture et des normes différenciées et distinctes des pratiques observées dans d'autres régions. Il est utile, par conséquent, de bien connaître les ressources énergétiques et leurs caractéristiques physiques afin d'évaluer leur utilité dans le bâtiment.

3. MÉTHODES

3.1 SPECIFICITE D'UNE ETUDE EN CLIMAT CHAUD

Les extrêmes du climat chaud et humide ne se trouvent que dans de rares endroits habités, par conséquent, il existe peu de recherches sur l'utilisation des ressources climatiques de l'environnement pour le refroidissement passif de l'habitat. L'environnement qui entoure le bâtiment d'un point de vue énergétique peut être décrit par le climat constitué des multiples données exposées précédemment. Ces paramètres sont utilisés notamment dans les simulations énergétiques des bâtiments. L'analyse des ressources énergétiques indique non seulement, que les bâtiments devraient répondre à la situation difficile créée par une combinaison d'une forte humidité constante, des températures élevées, de modestes fluctuations quotidiennes de la température et des quantités élevées de rayonnement solaire, mais aussi offre une possibilité d'utiliser au mieux ces ressources pour un rafraîchissement naturel. Dans le cadre de cet article, nous nous intéressons à différentes composantes de cet environnement afin de quantifier leurs apports d'un point de vue énergétique et de confort thermique.

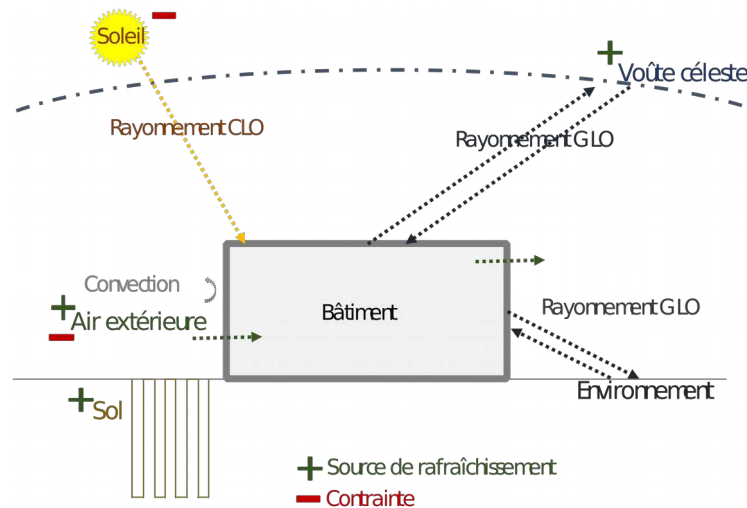


Figure 2 : Schéma des interactions énergétiques entre un bâtiment et son environnement

Il y a trois sources de rafraîchissement et deux contraintes qu'on peut alors évaluer en fonction des besoins de rafraîchissement du bâtiment (Figure 2). L'objectif de cette étude n'étant pas de concevoir des bâtiments passifs, mais de réduire la consommation énergétique en exploitant les sources de fraîcheur de l'environnement en évitant les contraintes. De ce fait le bâtiment étudié est toujours climatisé.

3.2 DEFINITION DE RESSOURCE

Dans cette étude, une ressource énergétique de l'environnement est considérée comme une ressource exploitable qui peut refroidir à partir du moment où sa température est inférieure à la température de confort acceptable. La ressource refroidit donc l'intérieur du bâtiment. Dans cette condition précise, et sur un site donné, on peut définir un potentiel total de rafraîchissement. Une solution technologique (le bâtiment y compris) exploite une partie de ce potentiel pour couvrir une part de son besoin de climatisation. Cette méthode basée autour de concept défini par (Chesné 2012) est appliquée sur un cas de Bâtiment à Djibouti.

3.3 CARACTERISTIQUES DES RESSOURCES

La ressource ciel : L'enveloppe d'un bâtiment échange de l'énergie par rayonnement en grandes longueurs d'onde (GLO) avec la voûte céleste. Cette dernière est considérée comme un corps gris à faible altitude auquel on attribue une température apparente de rayonnement, appelée température de ciel, qui est fictif, mais permet notamment de simplifier les calculs de rayonnement entre le ciel et l'enveloppe du bâtiment. Dans la littérature, il existe plusieurs modèles pour estimer la température et l'émissivité du ciel. Cependant, on peut noter un manque de travaux sur le rayonnement GLO dans les bâtiments en climat chaud et particulièrement en Afrique sub-saharienne. Dans tous les cas, les modèles utilisés donnent une température de ciel tout le temps inférieur à la température de l'air. De plus, la différence entre la température de l'air ambiant et la température du ciel est plus élevée durant la saison fraîche. Ce constat fait du ciel une ressource exploitable pour réduire les besoins d'un bâtiment. Pour exploiter cette ressource, il y a deux cas. Dans le premier cas et avec la présence du soleil, la ressource ciel n'est pas exploitable et parce que le soleil vient réchauffer les éventuels capteurs à une température supérieure à la température de confort intérieure acceptable. Ainsi, la ressource ne refroidit pas l'intérieur du bâtiment, mais compense les radiations solaires. Dans le deuxième cas et en absence du rayonnement solaire, le flux radiatif vers le ciel permet de rafraîchir le bâtiment. Ce refroidissement permet de stocker aussi la fraîcheur nocturne et de la restituer pendant la journée, et par conséquent, diminuer les besoins de refroidissements.

La ressource air : Cette ressource est exploitée par la ventilation naturelle et la convection, basées sur des interactions entre les sollicitations météorologiques et le bâtiment pour un rafraîchissement passif. L'évaluation de cette ressource utilise non seulement du débit de ventilation, mais, aussi du coefficient d'échange convectif, qui dépend de très grands nombres de paramètres.

La ressource sol : Quant à la ressource sol, elle se collecte que sur une zone hors emprise du bâtiment.

3.4 BASE DE LA METHODOLOGIE

3.4.1 Description générale

On calcule pour les ressources à exploiter le potentiel total de rafraîchissement caractéristique d'un site, sans une prise en compte détaillée du bâtiment. Puis par la suite, l'utilisation de ces ressources utiles par le bâtiment sera quantifiée par la modélisation énergétique. Un schéma simplifié de la démarche est donné sur la figure 3.

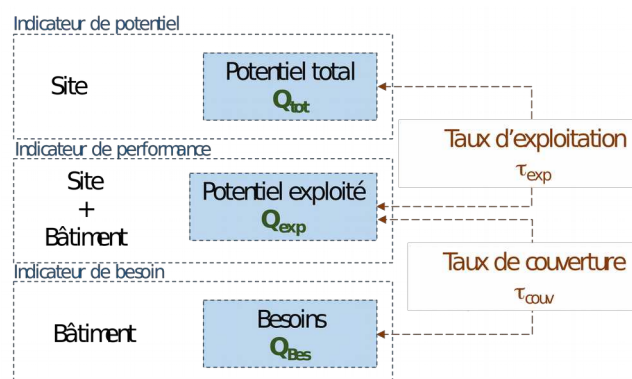


Figure 3 : Description de la méthode proposée

Le potentiel énergétique, que l'on peut qualifier de « total », Q_{TOT} , représente la quantité d'énergie, en jour, exploitable par un bâtiment d'une taille quelconque. Il s'agit du potentiel total de la ressource qui dépend du site et de la taille du bâtiment. La plus grande difficulté et la complexité dans l'évaluation du potentiel total bioclimatique est qu'il ne dépend pas de la composition des parois du bâtiment ni de la solution adoptée pour exploiter la ressource. A partir de ce potentiel, les façades et les compositions des parois peuvent être ajustées pour profiter de la ressource. Dans le principe de cette démarche, toutes les ressources de l'environnement peuvent avoir une influence sur les besoins d'un bâtiment, même si aucun dispositif particulier n'est mis en place pour exploiter ces ressources. À partir de la simulation classique d'un bâtiment dans son environnement, on peut non seulement introduire un potentiel de rafraîchissement exploité par le bâtiment, Q_{EXP} , pour rafraîchir l'espace habitable, mais aussi définir un besoin en climatisation, Q_{BES} , en jour.

Enfin, en plus de ces indicateurs absolus, on introduit, à partir du potentiel exploité, deux indicateurs relatifs pour comparer l'aptitude de plusieurs bâtiments ou plusieurs solutions techniques à exploiter les ressources. Il s'agit du taux d'exploitation de la ressource par le bâtiment qui donne le pourcentage du potentiel utile de la ressource effectivement exploité. Ainsi que le taux de couverture associé au besoin de rafraîchissement par la ressource qui donne le pourcentage des besoins couverts par la ressource.

3.4.2 Nécessite de faire évoluer les définitions des potentiels disponibles dans la littérature

Différentes méthodes existent pour évaluer le potentiel de rafraîchissement passif d'un site. Mais, ce serait une faute de ne pas renvoyer au travail de Chesné (Chesné 2012), qui en a jeté toutes les bases et qui est un pilier pour notre étude. Cependant, sa démarche a été développée sur la définition du soleil comme une ressource. Aussi, elle considère que la manière la plus simple de valoriser une ressource, en générale, est de le faire de manière instantanée, ce qui exclut toute possibilité d'optimiser la couverture de ressources par du stockage. Elle tient compte uniquement de la portion d'énergie de la ressource disponible quand il y a besoin d'énergie, or il peut y avoir des déphasages surtout pour des ressources de froid et donc il y a une nécessité de redéfinir sa méthode. En outre, elle compare le comportement du bâtiment dans deux simulations : une simulation classique du bâtiment dans son environnement et une simulation du bâtiment dans un environnement sans la ressource et cela donne une dynamique irréaliste puisqu'on enlève les puits de chaleur qui sont naturellement existants. La nouvelle méthode, simple et généralisable, proposée dans cette étude, est adaptée pour le climat chaud et humide quantifiant à la fois le gisement des ressources et l'exploitation qu'en fait le bâtiment.

3.4.3 Nouvelle approche d'évaluation de potentiels

La ressource ciel : Le gisement de la voûte céleste n'est pas infini : la quantité d'énergie que le bâtiment peut échanger avec le ciel est limitée, ne serait-ce qu'à cause de la surface de l'enveloppe du bâtiment qui est finie. Pour évaluer le potentiel total de rafraîchissement, un capteur de fraîcheur est étudié. Il s'agit d'un système composé d'un panneau radiant avec une surface dont l'émissivité en grande longueur d'onde est élevée. Thermiquement, le panneau peut être considéré comme un volume de contrôle de capacité thermique négligeable. En négligeant les transferts de chaleur par conduction, la surface rayonnante du panneau peut être caractérisée par sa température et sa surface qui représente dans notre cas la totalité de la surface du toit et la moitié des surfaces des murs. Ce capteur fonctionne

que pendant la nuit et se refroidit par rayonnement vers le ciel. La fraîcheur peut être stockée via un réservoir de stockage pour ensuite servir à refroidir le bâtiment pendant la journée. Pour estimer grossièrement ce potentiel, nous supposons l'hypothèse de masse thermique infinie, de manière à ce que toute la fraîcheur fournie par le ciel pendant la nuit puisse être restituée pendant la journée. Par conséquent, la température de stockage est égale à la température intérieure du bâtiment. La fraîcheur stockée pendant une nuit peut, donc, être estimée en considérant la température intérieure du bâtiment et de la température du ciel.

Dans le principe de cette démarche, toutes les ressources de l'environnement peuvent avoir une influence sur tous les besoins d'un bâtiment, même si aucun dispositif particulier n'est mis en place pour exploiter ces ressources. À partir de la simulation classique d'un bâtiment dans son environnement, on calcule un potentiel de rafraîchissement exploité par le bâtiment et intégré sur une journée.

La ressource air : De la même façon que précédemment, le potentiel énergétique de l'air, que l'on qualifie de « total » est calculé en combinant la ventilation et la convection. On définit, à chaque instant le potentiel total de l'air extérieur comme le flux échangé ; d'une part, avec l'air intérieur du bâtiment pour un débit donné de ventilation d'air à une température de consigne de rafraîchissement et d'autre part, avec l'enveloppe du bâtiment. Ce potentiel est égal à la somme du potentiel de ventilation dû à l'effet du vent, du potentiel de ventilation dû à l'effet thermique, ainsi que du potentiel dû à la convection, intégré sur une journée :

La difficulté réside, cependant, dans le calcul de deux renouvellements d'air qui dépendent de très grands nombres de paramètres et qui influent significativement sur le potentiel. Il est possible, d'identifier une configuration permettant d'estimer grossièrement ce potentiel lié au site à partir de l'enveloppe du bâtiment en adoptant la même logique que pour le cas du ciel. Pour faire l'analogie, le panneau radiant et le réservoir de stockage sont remplacés par la surface exposée face au vent du bâtiment, qui sert de capteur de vent et l'effet d'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment (avec une hypothèse de masse thermique infinie) qui sert de stockage de la fraîcheur fournie par la ventilation. On considère donc, une surface sans résistance et totalement « transparente » au vent.

Le potentiel total calculé précédemment correspond au potentiel total global récupérable pour un site donné afin d'assurer une ventilation naturelle à l'échelle urbain, partagé avec l'ensemble des bâtiments, et non à l'échelle du bâtiment lui-même.

En effet, quand les conditions sont favorables, ce potentiel, une fois intégré sur une période donnée (dans notre cas une journée), est très largement supérieure au besoin et ne nous renseigne pas sur le potentiel total local au bâtiment.

Pour évaluer l'aptitude de la ressource air à couvrir les besoins, nous allons utiliser un indicateur développé par Chesné (Chesné 2012) qui limite l'utilité du potentiel total global en valeur. On définit ainsi le potentiel ajusté au besoin de rafraîchissement du bâtiment en l'absence de la ressource air, comme la partie de l'énergie disponible de la ressource air qui permet de couvrir strictement les besoins. Autrement dit lorsque le potentiel total global existe, on ne garde que la valeur écriée par ce besoin. Et lorsque le potentiel total global est nul, on conserve cette valeur. Ainsi, en résumé, le potentiel ajusté est égal pour chaque journée au minimum entre le potentiel total et le besoin de rafraîchissement du bâtiment sans ventilation.

En gardant la même démarche que précédemment, on peut définir la part de la ressource air qui a été exploitée par le rafraîchissement du bâtiment comme la différence à chaque instant entre les besoins avec et sans ventilation, intégrée sur une journée.

La ressource sol : Il est possible, dans ce cas d'évaluer le potentiel total de rafraîchissement du sol avec la même la même logique que précédemment aussi. Ici, l'inertie du sol est utilisée comme « capteur » et un réservoir de stockage récupère le maximum de fraîcheur via un échangeur géothermique. On en déduit le potentiel total de rafraîchissement du sol en fonction de la température intérieure et de la température du sol à une profondeur qui dépend des contextes géographiques et climatiques.

4. APPLICATION DE L'APPROCHE SUR UN CAS DE BÂTIMENT TYPE À DJIBOUTI

Les indicateurs présentés dans la section précédente permettent de mettre en avant les caractéristiques principales d'un site et de mettre en évidence l'impact des différentes ressources énergétiques. Cette méthode peut être appliquée au cas particulier d'une maison individuelle sous le climat de Djibouti.

Le bâtiment utilisé pour mettre en œuvre la méthode d'analyse est une maison individuelle typique de Djibouti. Le modèle adopté est constitué d'une seule zone sur un niveau. Le bâtiment d'une superficie de 80 m² a été modélisé grâce à DesignBuilder.

Le confort thermique est assuré dans la zone par un générateur de puissance idéal qui gère le rafraîchissement avec une température de consigne intérieure de $T_R=26^{\circ}\text{C}$. Les valeurs des indicateurs pour tout le bâtiment sont calculées et intégrées d'abord sur l'année, afin d'avoir une vue globale des résultats. Ces derniers, rapportés à la surface habitable de la maison sont présentés dans le Tableau 1 :

	Ciel	Air
Potentiel total	430	-
Potentiel ajusté	-	101
Besoin	623	623
Potentiel exploité	148	61
Taux d'exploitation	34%	60%
Taux d'exploitation maximal	78%	100%

Tableau 1. Valeurs intégrées sur l'année des indicateurs pour le ciel [en kWh/(m².an)].

Plusieurs constats peuvent être tirés de ces valeurs. En premier lieu, le site dispose d'un grand potentiel de rafraîchissement qui pourrait drastiquement réduire les besoins de consommations si son exploitation est optimisée. Cependant, pour la ressource air comme pour le ciel, une comparaison avec la part de ce potentiel exploitée par l'état actuel de ce bâtiment type, donne un taux d'exploitation de la ressource assez faible par rapport au potentiel total (34% d'exploitation sur un maximum de 78 % pour le ciel et 60% d'exploitation pour l'air). En effet, plus le taux d'exploitation est élevé plus la ressource est effectivement utilisée par le bâtiment pour couvrir ses besoins. Ainsi, des faibles taux d'exploitation indiqueront qu'une grande marge de manœuvre est possible dans l'amélioration de la performance bioclimatique des bâtiments.

En restreignant la période d'intégration pour chaque jour dans la Figure 4, le potentiel total du ciel, bien que très variable dans le temps, est donc généralement disponible et le potentiel de l'air s'il est exploité efficacement par le bâtiment, peut couvrir la totalité des besoins de rafraîchissement durant la

saison fraîche sauf pour quelques jours exceptionnels. En outre, ces ressources sont intermittentes, puisque leurs potentiels s'annulent lorsque leur température devient supérieure à la température intérieure maximale acceptable. C'est le cas notamment en été. Durant la saison fraîche les besoins sont moins importants, et les potentiels à leur maximum. En été, les besoins sont très importants alors que les ressources sont à leur minimum.

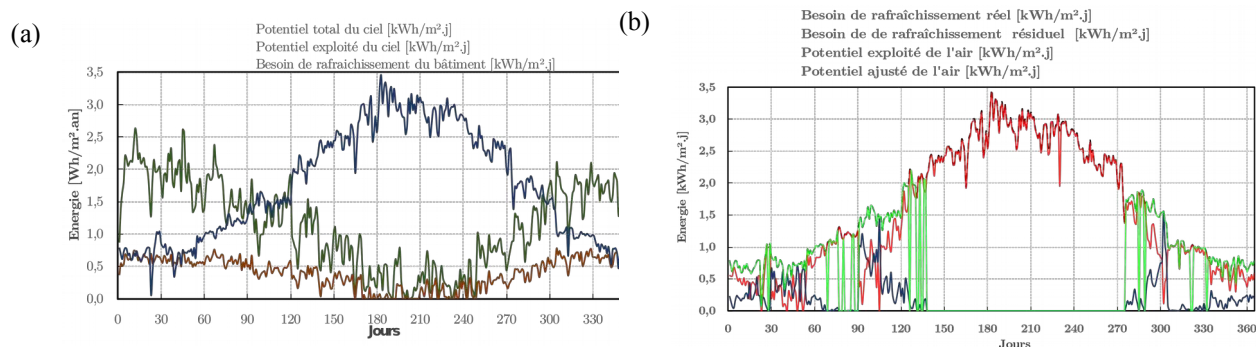


Figure 4 : (a) Indicateurs absolus et besoins de rafraîchissement quotidiens du bâtiment (b) Bilan des potentiels et des besoins journaliers pour la ressource air

Quant au potentiel du sol. En effet avec une surface de jardin S égale à la surface habitable du bâtiment étudié (80 m^2), le calcul du potentiel total, intégré sur une année et rapporté à la surface habitable donne $2 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$. Ce potentiel est négligeable comparé aux autres ressources. D'autant plus qu'il n'existe pas de puits « provençal » ou une actuelle exploitation du sol qui pourrait nous servir de calcul de potentiel exploité.

5. CONCLUSION

Une nouvelle méthodologie, simple et généralisable, a été développée pour quantifier la capacité des ressources énergétiques à couvrir la consommation d'énergie pour la climatisation et la possibilité pour le bâtiment de les exploiter. L'application de cette approche sur le cas de Djibouti a montré qu'il existe dans les climats chaud et humide, un potentiel de rafraîchissement satisfaisant pour les ressources ciel et air, mais qu'elles ne sont pas assez exploitées. Ce qui signifie qu'une grande marge bioclimatique est possible dans l'amélioration de la performance des bâtiments.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Aflaki, Ardalan, Norhayati Mahyuddin, Zakaria Al-Cheikh Mahmoud, et Mohamad Rizal Baharum. 2015. « A Review on Natural Ventilation Applications through Building Façade Components and Ventilation Openings in Tropical Climates ». *Energy and Buildings* 101 (août): 153-62. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>.
- Benhammou, M, et B Draoui. 2015. « Simulation et caractérisation d'un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie ». <http://www.webreview.dz>. 10 mars 2015. <http://www.webreview.dz/spip.php?article2365>.
- Butera, Federico, R Adhikari, et Niccolò Aste. 2015. *CONCEPTION ARCHITECTURALE DURABLE EN MILIEU TROPICAL Principes et applications pour l'Afrique de l'Est*.
- Chesné, Lou. 2012. *Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques*. Lyon, INSA. <http://www.theses.fr/2012ISAL0092>.
- DISED (Direction de la statistique et des Etudes Démographiques). 2015. *Annuaire Statistique*. Djibouti.

- Draoui, B, Mebarki B, Abdessemed S, Keboucha A, Drici S, et Sahli A. 2015. « Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar ». <http://www.webreview.dz>. 11 mars 2015. <http://www.webreview.dz/spip.php?article2384&lang=fr>.
- Dunham, Daniel. 1983. *Building for the maritime desert : climate, construction, and energy in Djibouti* /. Arlington, Va. (1815 N. Lynn St., Suite 200, Arlington 22209) : Volunteers in Technical Assistance.
- Elshafei, Ghada, Abdelazim Negm, Mahmoud Bady, Masaaki Suzuki, et Mona G. Ibrahim. 2017. « Numerical and Experimental Investigations of the Impacts of Window Parameters on Indoor Natural Ventilation in a Residential Building ». *Energy and Buildings* 141 (avril): 321-32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.055>.
- Givoni, Baruch. 1994. *Passive Low Energy Cooling of Buildings*. John Wiley & Sons.
- Granqvist, C.G., S. Green, G.A. Niklasson, N.R. Mlyuka, S. von Kræmer, et P. Georén. 2010. « Advances in Chromogenic Materials and Devices ». *Thin Solid Films* 518 (11): 3046-53. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.08.058>.
- Kottek, Markus, Jürgen Grieser, Christoph Beck, Bruno Rudolf, et Franz Rubel. 2006. « World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated ». *Meteorologische Zeitschrift* 15 (3): 259-63. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- Molina, Jose Luis, Evyatar Erell, et Simos Yannas. 2013. *Roof Cooling Techniques: A Design Handbook*. Routledge.
- Omar, Abdou Idris, Joseph Virgone, Etienne Vergnault, Damien David, et Abdoukader Ibrahim Idriss. 2017. « Energy Saving Potential with a Double-Skin Roof Ventilated by Natural Convection in Djibouti ». *Energy Procedia* 140 (décembre): 361-73. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.149>.
- Smith, G.B., S. Dligatch, et F. Jahan. 1998. « Angular Selective Thin Film Glazing ». *Renewable Energy* 15 (1-4): 183-88. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00151-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00151-7).