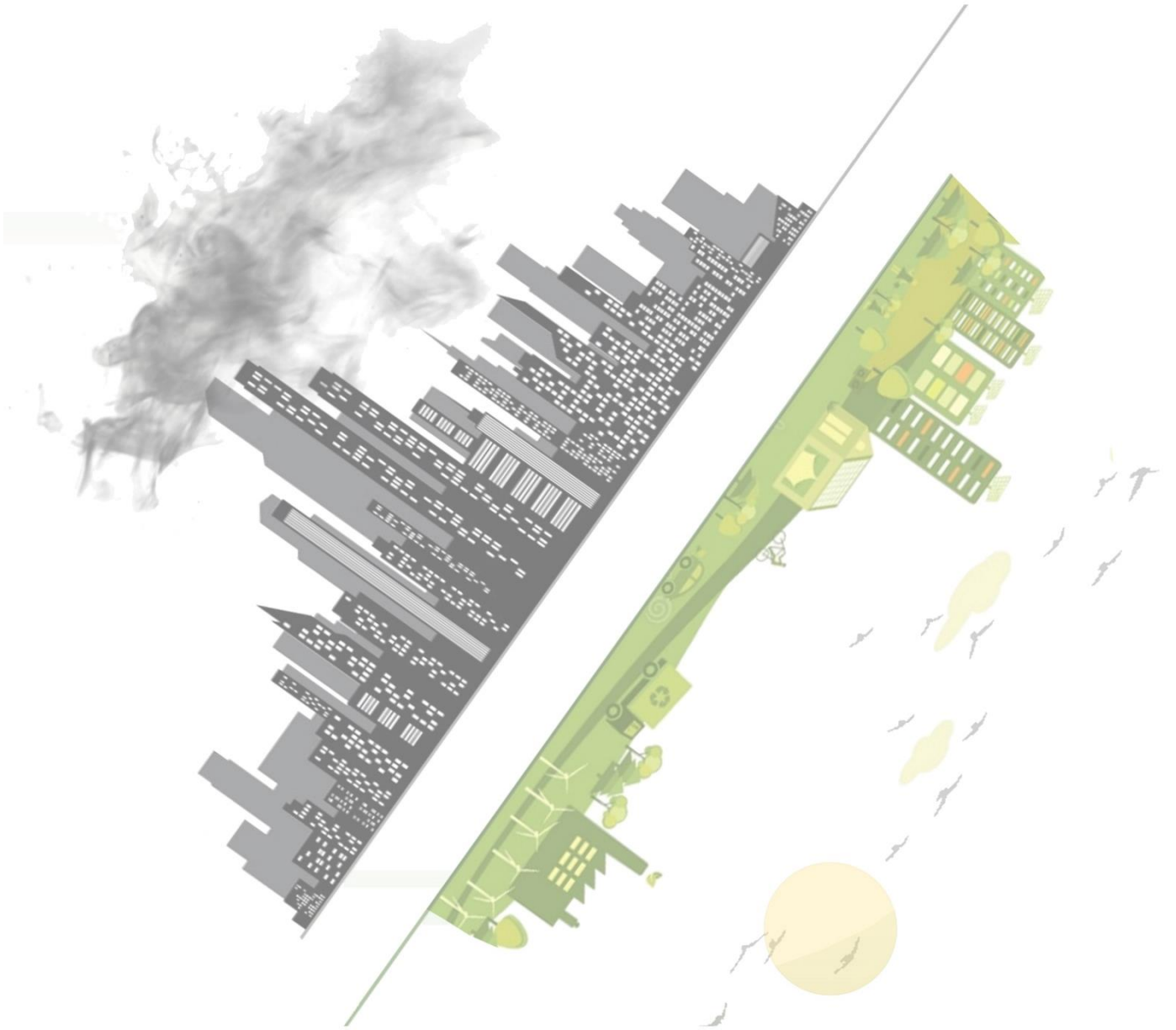


ACTES DE COLLOQUE

ACT FOR BETTER SUSTAINABLE CITIES

1st EDITION OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE
SUSTAINABILITY OF THE BUILT ENVIRONNEMENT (ISSBE-2023)



5/6 mai 2023 - Cité des sciences - Tunis – Tunisie



المدرسة الوطنية للهندسة المعمارية والتخطيط
ÉCOLE NATIONALE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME

LARPA
Laboratoire de Recherche en
Planification et Architecture

PAE
Planification et Architecture



HEINRICH BÖLL STIFTUNG
TUNISIA
Tunis



1st Edition of the International Symposium on the Sustainability of the Built Environment (ISSBE-2023)

5-6 Mai 2023 – Cité des sciences de Tunis – Tunisie

Proceedings of Engineering & Technology-PET-Vol 81

Copyright © 2023

ISSN: 1737-9334

PREFACE

La région méditerranéenne fait face depuis le début du siècle à de nombreux challenges relatifs aux effets du réchauffement climatique dans les villes. Il est donc pressant aujourd’hui de guider les décideurs dans leurs choix. La recherche scientifique est le premier pilier pour relever les points essentiels à retenir et pour tracer des lignes directrices d’une conception durable du cadre bâti.

Le laboratoire de recherche en Patrimoine et Architecture (LARPA), en particulier l’unité de recherche Patrimoine architectural et environnemental, Connaissance Compréhension et Conservation (PAE3C) œuvre depuis sa création en 2013 à préserver le patrimoine architectural et environnemental et promouvoir un développement durable. Nous cherchons donc à travailler sur les thématiques relatives à la résilience locale et le changement climatique d’une part et au patrimoine architectural et sa grande valeur culturelle et environnementale de l’autre.

C’est dans ce cadre et afin de relever ces défis que nous avons décidé d’organiser le symposium sur la durabilité du cadre bâti dans sa première édition « act for better sustainable cities ».

Je profite de cette occasion pour exprimer ma sincère et profonde gratitude aux participants, au comité d’organisation, au comité scientifique, à nos partenaires ainsi qu’à tous les intervenants.

Pr. Fakher Kharrat,

Directeur du laboratoire de recherche LARPA, Equipe PAE3C
Directeur de l’Ecole Nationale d’architecture et d’urbanisme de Tunis (ENAU) –
Université de Carthage
E-mail : fakher.kharrat@enau.ucar.tn

PREAMBULE

La réalité du changement climatique est devenue aujourd’hui sans équivoque, une réalité marquée surtout par des épisodes caniculaires mais aussi par une longue période de sécheresse et une ratification des ressources. Le colloque scientifique

« ACT FOR BETTER SUSTAINABLE CITIES »

s’est penché sur la problématique de durabilité dans les zones d’agglomération. Durant deux journées, nous avons pu avoir l’intervention de différents spécialistes qui ont examiné la durabilité du cadre bâti sous différents angles de vue et à différentes échelles du territoire au bâtiment mais également tout le long du cycle de vie du cadre bâti depuis la planification jusqu’à l’exploitation. Les interventions et échanges ont pu questionner notre mode d’habiter et d’occuper l’espace.

Ce colloque était donc une occasion pour unir les efforts afin de pouvoir agir d’une manière efficace. Il a pu rassembler les scientifiques, professionnels du bâtiment, industriels, architectes, urbanistes, ingénieurs, mais aussi sociologues, experts en droit d’environnement, représentants des institutions publiques, société civile etc., tous différents mais unis pour une seule cause ! Ce fut une occasion pu créer un lien entre la recherche scientifique et le milieu professionnel. C’était une opportunité pour établir un dialogue entre théorie et pratique, entre les idées et les actions : un dialogue indispensable pour pouvoir boucler la boucle de la chaine de fabrication des villes depuis la production jusqu’à l’usage.

Nous tenons donc à remercier toutes les personnes qui nous ont honoré de leur présence et ont contribué à la richesse des débats et la réussite de cet évènement.

Dr. Nour El Houda Jouini,

Coordinatrice générale

E-mail : nourhouda.jouini@enau.ucar.tn

COMITE D'ORGANISATION

- **Nour El Houda Jouini**, Architecte, Docteur en sciences de l'architecture, LaRPA (équipe PAE3C), ENAU, Université de Carthage, Tunis
- **Safa Achour Younsi**, Architecte, Docteur en sciences de l'architecture, Maître-assistante habilitée à diriger les recherches à l'ENAU, LaRPA (équipe PAE3C), ENAU, Université de Carthage, Tunis
- **Asma Guedria**, Architecte, Docteur en sciences de l'architecture, Maître-assistante à l'ISTEUB, LaRPA (équipe PAE3C), Université de Carthage, Tunis
- **Athar Chabchoub**, Architecte, Docteur en sciences de l'architecture, LaRPA (équipe PAE3C), enseignante-chercheuse à l'ENAU, Université de Carthage, Tunis

PARTENAIRES

- **Nidhal Attia**, Coordinateur programme, Fondation Heinrich Böll Stiftung Tunisie, Tunis
- **Emna Fourati**, Fondation Heinrich Böll Stiftung Tunisie, Tunis
- **Safaa Cherif**, Architecte, Doctorante, Université La Sapienza / Université de Carthage, membre LaRPA (équipe PAE3C), Trésorière de l'association *Edifices & Mémoires*, Tunis

COMITÉ SCIENTIFIQUE

- **Fakher Kharrat**, Architecte, Professeur à l'ENAU, LaRPA, ENAU, Université de Carthage, Tunis
- **Yadh Zahar**, Ingénieur-Urbaniste, Professeur à l'ENAU, Université de Carthage, Tunis
- **Sami Yassine Turki**, Ingénieur-Urbaniste, Maître de conférences à l'ISTEUB, Université de Carthage, Tunis
- **Afef Hammami Marrakchi**, Maître de conférences en droit, FDSF, Université de Sfax, Sfax
- **Hind Karoui**, Architecte, Maître de conférences à l'ENAU, Université de Carthage, Tunis
- **Safa Achour Younsi**, Architecte, Docteur en sciences de l'architecture, Maître-assistante habilitée à diriger les recherches, à l'ENAU, Université de Carthage, Tunis
- **Olfa Ben Medien**, Architecte-Urbaniste, Maître-assistante à l'ISTEUB, Université de Carthage, Tunis
- **Hind Ben Othmen**, Architecte-Urbaniste, Maître-Assistante à l'ISTEUB, Université de Carthage, Tunis
- **Lilia Makhloufi**, Architecte, HDR, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU), Alger
- **Yasmine Attia Ben Cherifa**, Architecte-Urbaniste, Maître-assistante à l'ISTEUB, Université de Carthage, Tunis

A PROPOS DE LA CONFERENCE

CONTEXTE GÉNÉRAL

Cette dernière décennie a été marquée par une hausse considérable des températures, les plus hautes jamais enregistrées. Ce réchauffement climatique engendre non seulement des risques environnementaux mais aussi des risques socio-économiques et sanitaires de plus en plus étendus. Le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC)¹ insiste sur l'état d'urgence et le risque accru des changements climatiques en région méditerranéenne. Celle-ci est considérée comme un « *Hot spot* » au changement climatique pour ses nombreux facteurs de vulnérabilité : des activités humaines concentrées sur les zones littorales, une forte dépendance à la ressource en eau, un climat favorisant les sécheresses et les événements extrêmes comme les crues éclair – appelées également « épisodes méditerranéens ».

Désormais, villes et changement climatique sont intimement liés. Au niveau mondial, les villes consomment plus des deux tiers de l'énergie et sont à l'origine de plus de 70% des émissions de CO₂. « Les choix qui seront faits en matière d'infrastructures urbaines dans les décennies à venir – qu'il s'agisse d'urbanisme, de rendement énergétique, de production d'énergie ou de transports – auront une incidence décisive sur les rejets de gaz à effet de serre. C'est bien dans les villes que se décidera l'issue de la bataille du climat », a rappelé António Guterres, le Secrétaire général de l'Organisation des Nations Unies (ONU). En regardant de près, le cadre bâti se retrouve être au cœur de la problématique. En effet, selon l'ONU environnement, le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie avec 37% de la consommation totale dans le monde en 2021².

Les objectifs du développement durables (ODD) établis par les Nations Unies pour les stratégies d'adaptation, prônent des villes et communautés durables. Ces objectifs recommandent que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables par le biais de l'aménagement territorial, l'urbanisme durable, la mobilité, l'architecture durable, les matériaux locaux

¹ *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* paru en 2022 et *Climate change 2028 ; Synthesis report* paru en 2023

² 2021 Global Status Report for Buildings and Construction

etc., mais aussi en préservant la biodiversité et les ressources naturelles et humaines. Près d'une centaine de grandes agglomérations de par le monde (Los Angeles, Paris, Londres...) ont déjà reconnu l'urgence climatique et opté pour des stratégies d'adaptation. Elles ont adopté, en octobre 2022, un « *global green new deal* » (nouveau pacte vert) s'engageant à remplacer les véhicules polluants par des alternatives propres, à réaliser des bâtiments « *zéro carbone* » et une politique « *zéro déchet* ». Le secteur a en effet un fort potentiel d'atténuation au vu des alternatives qui paraissent et qui intéressent de plus en plus les chercheurs.

ARGUMENTAIRE

Cette conférence est proposée dans le cadre des enjeux associés à la durabilité des villes de demain. Il s'agit de mettre l'accent sur la vulnérabilité environnementale et socio-économique dans les zones d'agglomérations et étaler les nouvelles solutions envisagées pour y faire face.

Cette conférence offre un forum interdisciplinaire qui est l'occasion de rassembler chercheurs, praticiens, universitaires et chercheurs dans différents secteurs pour débattre, échanger et partager leurs expériences et leurs résultats de recherche sur tous les aspects des préoccupations, méthodes et approches concernant la durabilité du cadre bâti. Le but de cette conférence est donc:

- D'étudier les risques auxquels les villes sont confrontées face aux changements climatiques, et d'en présenter les répercussions environnementales en termes de biodiversité, pollution etc. mais aussi les répercussions socio-économiques
- D'aborder la gouvernance durable et les problématiques juridiques liées au droit de l'environnement dans le cadre bâti
- D'envisager les principes de conception d'un aménagement territorial, un urbanisme et des bâtiments durables qui prennent en considération le facteur climatique en vue d'améliorer la qualité de vie des citoyens que cela soit d'un point de vue de confort, de gestion des ressources en énergie et en eau, des risques sanitaires ...
- De traiter la durabilité du cadre bâti en traitant l'emboîtement des échelles urbaine et architecturale, qui sont intimement liés et qui sont dépendantes
- De mettre en avant les technologies et les solutions novatrices et innovantes pour un cadre bâti durable
- De mettre l'accent sur l'innovation en termes de matériaux de construction durables
- D'aborder la durabilité en rapport avec le patrimoine architectural et urbain

Les objectifs de cette rencontre visent, non seulement la sensibilisation des différents acteurs quant à leur rôle dans la transition durable des villes, mais aussi, par un retour d'expériences, échanger les connaissances autour du sujet.

AXES THÉMATIQUES

Cette conférence internationale pluridisciplinaire appelle à des contributions des disciplines traitant du droit de l'environnement, l'urbanisme, l'architecture, le patrimoine, et l'ingénierie. Le colloque se focalise particulièrement sur les thématiques suivantes, et non limitées :

1. Changement climatique, vulnérabilité et risques dans les zones d'agglomérations

- Risques et vulnérabilité environnementale dans les zones d'agglomérations
- Préservation de la biodiversité et du patrimoine naturel dans les zones d'agglomérations
- Impacts socio-économiques liés aux changements climatiques dans les zones d'agglomérations

2. Droit, gouvernance durable du cadre bâti

- Planification, politiques et stratégies d'adaptation
- Droit de l'environnement et réglementations liés au développement durable du cadre bâti
- Gouvernance participative et durable du cadre bâti
- Développement régional et impacts sociaux-économiques

3. Territoire et urbanisme durable

- Aménagement territorial, villes et communautés résilientes
- Urbanisme durable
- Gestion des ressources en énergie et en eau dans le cadre bâti
- Morphologie urbaine et performance environnementale
- Transports et mobilités durables
- Infrastructures durables
- Technologies, modèles, méthodes et outils innovants pour l'aménagement du territoire
- Approche durable dans l'enseignement de l'urbanisme et l'aménagement du territoire

4. Bâtiment et architecture durable

- Bâtiment durable et architecture bioclimatique
- Résilience environnementale et socio-économique des bâtiments
- Efficience énergétique et confort thermique du bâtiment
- Energies renouvelables
- Matériaux de construction durables et innovation
- Rénovation thermique et énergétique des bâtiments
- Technologies, modèles, méthodes et outils innovants pour le bâtiment
- Approche durable dans l'enseignement de l'architecture

5. Patrimoine bâti et développement durable

- Durabilité et patrimoine comme source d'inspiration pour un cadre bâti durable
- Restauration et réhabilitation durables
- Pratiques participatives durables pour la préservation et la promotion du patrimoine
- Technologies, modèles, méthodes et outils innovants pour le patrimoine

ORGANISATEURS ET PARTENAIRES

- Le colloque international « Act for better sustainable cities » est organisé par le **Laboratoire de Recherche en Patrimoine et Architecturologie LaRPA (LR21ES20)**, plus spécialement l'équipe **PAE3C : Patrimoine architectural et environnemental, Connaissance Compréhension et Conservation** ; de l'Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis (ENAU), Université de Carthage. L'équipe de recherche traite deux axes majeurs : L'étude et la préservation du patrimoine bâti et l'évaluation de la durabilité des architectures à l'échelle urbaine et architecturale.

Les partenaires de ce colloque sont :

- **L'organisation Heinrich Böll Stiftung (HBS) –Tunis** qui est une organisation non-gouvernementale allemande « verte » qui collabore avec des partenaires dans plus de 60 pays et qui dispose d'un réseau de 34 bureaux dans le monde. Parmi les principes et valeurs qui les animent, ils aspirent à faire valoir la dignité humaine, défendre les droits des générations futures à un environnement sain et promouvoir l'égalité des opportunités pour toutes et pour tous. Leurs principes fondamentaux sont essentiellement le développement durable, la démocratie et les droits humains.
- **L'association Edifices & Mémoires**, qui vise la réappropriation "autrement" du patrimoine, elle se place comme organisme médiateur entre la recherche scientifique et l'action citoyenne. Edifices & Mémoires cherche à offrir à tous, non seulement, un terrain de recherche-action pluridisciplinaire pour ceux qui auront besoin d'avoir accès à des relevés, des cartographies, des informations sur des lieux faisant partis de notre mémoire d'hier et d'aujourd'hui, mais aussi à offrir un terrain d'études, d'immersion et de rencontre entre des professionnels, académiques, artistes et tout citoyen voulant valoriser et mettre en place de nouvelles technologies pour faciliter l'accès et s'appropriier "autrement" le patrimoine.

PROGRAMME

Jour 1 : Vendredi 5 mai 2023

08h30-09h00 : Accueil des participants et enregistrement

Séance plénière

09h00-09h15 : Mot d'ouverture par :

- Pr. Fakher KHARRAT, directeur de l'ENAU et directeur du laboratoire de recherche LarPA,
- Dr. Heike LÖSCHMANN, directrice fondation HBS Tunisie
- Mme Safaa CHERIF représentante de l'association Edifices et Mémoires.

09h15-09h30 : Présentation du colloque : *Les enjeux climatiques dans le processus de fabrication de la ville* – Dr. Nour El Houda JOUINI – Coordinatrice générale du colloque

AXE 1 : Changement climatique, vulnérabilité et risques dans les zones d'agglomérations

09h30-09h50 : Intervention plénière : *Vulnérabilité environnementale et stratégies d'adaptation en Tunisie dans le secteur du bâtiment* – Mr. Mounir BAHRI – Consultant international et Président du TGBC

09h50 - 10h05 : Présentation orale n°1: *Proposal of a coupled classification method (Fuzzy-AHP/PCA-Kmeans) of "Imadats": Case study: Grand Tunis* - Hadil HOUIMLI

10h05 – 10h15 : Discussion

10h15 – 10h30 : Pause-café

AXE 2 : Droit, gouvernance durable du cadre bâti

10h30 – 10h50 : Intervention plénière : *Repenser le code d'urbanisme pour une approche durable* - Pr. Afef HAMMEMI-MARRAKCHI – Professeure en droit – FDS Tunisie avec Nidhal ATTIA – Coordinateur programme HBS Tunisie

10h50 – 11h00 : Discussion

AXE 3 : Territoires et urbanisme durable

11h00 – 11h30 : Intervention plénière : *Penser l'urbain pour une meilleure durabilité* – Dr. Olfa BEN MEDIEN – Maître-assistante en urbanisme - ISTEUB

11h30 – 12h00 : Intervention plénière : *Vulnérabilités vs résilience urbaines et architecturales au Grand Tunis dans un contexte de changement climatique* – Pr. Mahmoud ABDESSELEM – Professeur en urbanisme – ENAU

12h00 – 12h15 : Discussion

12h15 – 12h30 : Présentation orale n°2 : *Generative design of urban morphology: optimization of solar acces and densification* - Leila KOUBAA TURKI et Abdelkader BEN SACI

12h30 – 12h45 : Présentation orale n°3 : *Effets de la morphologie urbaine et de la végétation sur l'environnement thermique : Cas de la ville chaude et aride de Ghardaia, Algérie*- Rachid AMIEUR, Djamila ROUAG-SAFFIDINE et Christiane WEBER

12h45-14h00 : Pause déjeuner

14h00 – 14h30 : Session poster :

- Poster 1 : *New reading of a cultural port landscape located in Ghar El Melh: Towards an ecodeveloppement model of a small morisco tunisian town* - Sahar KARRAY, Angel RAUL RUIZ PULPON et Hichem REJEB
- Poster 2 : *L'héritage urbain moderne du XX^e siècle au prisme de la durabilité : Cas des quartiers d'El Menzah 1 et de la cite Mahrage* – Dr. Salma GHARBI
- Poster 3 : *Une zone de friches ferroviaires et industrielles devenue un pôle de transport de vie et de rencontre agréable, sécurisé et durable. Cas de la gare ferroviaire de la ville de Sétif* – Imène MESSAOUI

14h30 – 14h45 : Discussion

AXE 4 : Patrimoine bâti et développement durable

14h45 – 15h15: Intervention plénière: *Architectural heritage and sustainability: the contribute of Projet CUBÂTI* – Pr. Maria Luisa GERMANA – Professeure en technologie d'architecture – UNIPA ITALY

15h15 – 15h30: Présentation orale n°4 : *Assessment of residential settlement planning in Medina Based on Climate Adaptability* – Habiba BENZARTI GHEDAS, Abdelmajid JEMNI et Coloma Pico ELOI

15h30 – 15h45 : Discussion

15h45 – 16h00 : Clôture de la première journée

Jour 2 : La samedi 6 mai 2023

08h30-09h00 : Accueil des participants

AXE 5 : Bâtiment et architecture durable

09h00 – 09h30 : Intervention plénière : *L’empreinte carbone comme outil de décision au choix des matériaux de construction* – Dr. Ahmed JELIDI – Maître de conférences en génie civil – ENIT

09h30 – 09h45 : Présentation orale n°5 : *La rénovation énergétique et son impact sur l’efficacité énergétique : cas d’un bâtiment fortement vitré* - Samira BOUKETTA

09h45 – 10h00 : Présentation orale n°6 : *Architecture durable, enseignement & immersion professionnelle : expérience pilote d’un concours international interuniversitaire* - Emna BCHIR et Leila CHENNOUFI

10h00 – 10h15 : Présentation orale n°7 : *L’architecture circulaire au service du développement durable*- Imène SLAMA et Racha BEN ABDELJELIL

10h15 – 10h25h: **Session poster**

- Poster 4 : *Développement d’un enseignement “des matières et des matériaux” basé sur les objectifs du développement durable*- Dr. Hedia BEN NILA

10h25 – 10h40 : Discussion

10h40 – 11h00 : Pause-café

11h00 – 12h30 : Session panel de discussion : **Quelles stratégies adopter pour les villes durables de demain dans les pays du Maghreb ?**

12h30 – 12h45 : **Compte rendu du panel**

12h45 – 13h00 : **Séance de clôture** : Distribution des attestations, Mot de la fin et photo de groupe.

A PROPOS DU COMITE D'ORGANISATION



Dr. Nour El Houda Jouini

Architecte, Docteure en architecture, LaRPA, PAE3C, ENAU, Université de Carthage, Tunis

Email nourhouda.jouini@enau.ucar.tn

LinkedIn <https://www.linkedin.com/in/nour-el-houda-jouini-547537107/>

Orcid ID <https://orcid.org/0000-0002-9016-9314>

Dr. Nour El Houda Jouini est architecte membre du laboratoire de recherche LaRPA équipe PAE3C de l'Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis. Elle est la porteuse d'idée et coordinatrice générale du présent colloque « Act for better sustainable cities ».

Elle a eu son diplôme d'architecte et son doctorat de l'ENAU respectivement en 2013 et 2021. Sa thèse traite de l'adaptation au changement climatique du cadre bâti. En effet, son travail de recherche a pour objectif principal le diagnostic et l'évaluation de la qualité environnementale des quartiers résidentiels du Grand Tunis et ce à une échelle urbaine et architecturale.

Elle enseigne depuis 2016 à l'Ecole supérieure d'architecture d'audiovisuel et de design. Elle a la double casquette de l'enseignant-chercheur et du professionnel vu qu'elle travaille en parallèle depuis 2017 comme architecte collaboratrice au sein de l'agence Zigzag architecture, géré par son conjoint Zied Ben Taher. Elle est également activiste auprès de la société civile.

A travers la publication d'articles scientifiques, mais aussi ses participations associatives et ses articles de vulgarisation, elle cherche à sensibiliser tout aussi bien les professionnels que le grand public à l'urgence d'une résilience et d'une meilleure culture du bâti dans les espaces urbains et architecturaux.



Dr. Safa Achour-Younsi

Architecte, Docteure en architecture, Maître-assistante habilitée à l'ENAU, LaRPA, PAE3C, ENAU, Université de Carthage, Tunis

Email safa.achouryounsi@enau.ucar.tn

LinkedIn <https://www.linkedin.com/in/safa-achour-younsi-45069a28/>

Scopus Author ID: 57223797029

Orcid ID <https://orcid.org/0000-0003-4791-2579>

Dr Safa Achour Younsi est architecte et maître-assistante habilitée à diriger les recherches à l'Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis. Engagée dans l'enseignement et la recherche en architecture, elle est un des membres fondateurs de l'unité de recherche PAE3C promue au rang de Laboratoire de Recherche LaRPA. Elle est membre du comité d'organisation et membre du comité de lecture du présent colloque « Act for better sustainable cities ».

Elle est l'auteure d'une thèse de Doctorat en architecture obtenue en 2015 à l'Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis et qui traite de l'évaluation des conditions de confort thermique d'été en espaces extérieurs à Tunis. Elle s'intéresse au phénomène d'îlot de chaleur urbain en comparant les tissus historiques et les nouveaux quartiers.

Après 10 ans de parcours professionnel à l'Institut Supérieur des Arts Multimédias de la Manouba (2009-2019) entre l'enseignement du Design en Multimédia, de la modélisation 2D, 3D ainsi que l'animation 3D orientée films d'animations et jeux vidéo, et l'encadrements des Projets de Fin d'études et des Mémoires de Masters Professionnels en Animation 3D, Dr. Safa a intégré l'Ecole Nationale d'architecture et d'Urbanisme de Tunis en tant que maître-assistante. Elle obtient son habilitation à diriger des recherches en Architecture en 2023.

Depuis 2020, elle a été nommée Directrice des Etudes et Directrice Adjointe de l'ENAU.



Dr. Asma Guedria

Architecte, Docteure en architecture, Maître- assistante à l'ISTEUB, LaRPA, PAE3C, Université de Carthage, Tunis

LinkedIn www.linkedin.com/in/asma-guedria-240486115

ORCID Id <https://orcid.org/0000-0001-7930-9008>

Dr. Asma Guedria est architecte de formation diplômée depuis 2006. Elle a obtenu son Mastère en sciences des formes de l'Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis (ENAU), en 2009. Docteure en sciences de l'architecture, elle est l'auteure d'une thèse, qui porte sur l'architecture traditionnelle de Nefta et le développement durable, soutenue à l'ENAU en 2016.

Elle est enseignante universitaire depuis 2009. Depuis 2011, elle est membre fondatrice l'équipe de recherche PAE3C (Patrimoine Architectural et Environnemental ; Connaissance, Compréhension et Conservation) au sein du Laboratoire de Recherche LaRPA à l'ENAU.

Depuis 2013, elle est assistante de l'enseignement supérieur et maître- assistante depuis 2022 à l'Institut Supérieur des Technologies de l'Environnement, de l'Urbanisme et du Bâtiment (ISTEUB).

Elle est également l'auteure de plusieurs articles scientifiques qui traitent des problématiques de la durabilité en architecture.

Elle a été membre du comité d'organisation du présent colloque international, qui s'est tenu les 5 et 6 mai 2023 à la Cité des Sciences de Tunis, intitulé " 1st Edition of the International Symposium on the Sustainability of the Built Environment (ISSBE-2023) – Act for better sustainable cities) ".



Dr. Athar Chabchoub

Architecte, Docteure en architecture, LaRPA, PAE3C, enseignante-chercheuse à l'ENAU, Université de Carthage, Tunis

Email athar.chabchoub@enau.ucar.tn

Linkedin <https://www.linkedin.com/in/athar-chabchoub-160511281/>

Scopus Author ID: 57226031019

Orcid ID <https://orcid.org/0000-0002-9295-9731>

Dr. Athar Chabchoub, architecte de formation, celle-ci a emprunté le chemin de la recherche scientifique. Elle a obtenu son diplôme de Mastère en sciences des formes de l'École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis (ENAU), en 2013, avec la mention très bien. Docteure en sciences de l'architecture, elle est l'auteure d'une thèse, qui étudie et évalue le confort thermique et son impact sur la consommation énergétique des bâtiments coloniaux et contemporains du quartier Lafayette à Tunis, évaluée, en 2019, très honorable à l'unanimité.

Simultanément, elle a entrepris une carrière universitaire pour devenir enseignante-chercheuse, depuis 2013 à l'ENAU. Elle a également revêtu, depuis trois ans, la casquette de coordinatrice de l'équipe de recherche PAE3C au sein du Laboratoire de Recherche LaRPA, ENAU.

Ce présent colloque international « Act for better sustainable cities » est le second colloque qu'elle organise tout en étant en même temps la responsable scientifique, responsable de la conception graphique et membre du comité d'organisation.

Elle a aussi participé à deux projets de recherche transfrontaliers entre la Tunisie et l'Italie (l'un concerne la digitalisation du Patrimoine, et l'autre, l'innovation dans le domaine de la construction durable), à diverses conférences internationales (par le biais de présentations orales, de posters scientifiques) et a été l'auteure de plusieurs articles dans des revues scientifiques à comité de lecture.

Récemment, elle a été membre du comité scientifique de la conférence internationale « 6th International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism - ICCAUA2023, 14-16 juin 2023, Istanbul, Turquie.

SOMMAIRE

AXE 1 : CHANGEMENT CLIMATIQUE, VULNERABILITE ET RISQUES DANS LES ZONES D'AGGLOMERATIONS

Evaluation of Environmental Vulnerability to Floods in Greater Tunis: A Coupled Classification Approach (Fuzzy-AHP/PCA-Kmeans) of Imadats

Hadil HOUIMLI **p20**

AXE 2 : DROIT, GOUVERNANCE DURABLE DU CADRE BATI

AXE 3 : TERRITOIRES ET URBANISME DURABLE

Generative design of urban morphology: optimization of solar access and densification

Laila KOUBAA TURKI - Abdelkader BEN SACI **p39**

Effets de la morphologie urbaine et de la végétation sur l'environnement thermique. Cas de la ville chaude et aride de Ghardaia, Algérie

Rachid AMIEUR, Djamila ROUAG-SAFFIDINE, Christiane WEBER **p51**

New reading of a cultural port landscape located in ghar el melh: towards an ecodéveloppement model of a small morisco tunisian town

Sahar KARRAY, Angel Raul Ruiz PULPÓN, Hichem REJEB **p63**

AXE 4 : PATRIMOINE BATI ET DEVELOPPEMENT DURABLE

L'héritage urbain moderne du XXe siècle au prisme de la durabilité : Cas des quartiers d'El Menzah 1 et de la cite Mahragène

Salma GHARBI **p73**

Assessing the climate response of vernacular settlements within the medina of Tunis

Habiba BENZARTI EP GHEDAS, Abdelmajid JEMNI, Eloi Coloma PICO **p89**

AXE 5 : BATIMENT ET ARCHITECTURE DURABLE

Multi-university practicum teaching for a paradigm shift: Pioneering an international competition of sustainable architecture in Tunisia

Emna BCHIR, Leila CHENNOUFI **p 99**

L'architecture circulaire au service du développement durable

Imène SLAMA, Racha BEN ABDELJELIL **p113**

AXE 1: CHANGEMENT CLIMATIQUE, VULNERABILITE ET RISQUES DANS LES ZONES D'AGGLOMERATIONS



Vulnérabilité environnementale et stratégies d'adaptation en Tunisie dans le secteur du bâtiment
– Mr. Mounir Bahri – TGBC

« Le bâtiment est le problème mais il est aussi la solution »

Mr Bahri, président du *Tunisian Green Building Council (TGBC)*, a longtemps discuté lors de sa présentation des stratégies d'adaptations tunisiennes ; notamment la stratégie nationale de transition énergétique à l'horizon de 2030. Il a mis l'accent sur la vulnérabilité environnementale de la Tunisie et le rôle important du bâtiment dans la consommation finale d'énergie mais aussi son fort potentiel d'atténuation.

Il a également exposé différents travaux entrepris par l'Agence Nationale de Maîtrise d'Energie (ANME) en termes de réglementation et de projets énergétiques et a essayé de présenter brièvement le label de performance énergétique Ecobat. Il a aussi mis en exergue le rôle du TGBC dans la lutte pour la transition énergétique des bâtiments.

Evaluation of Environmental Vulnerability to Floods in Greater Tunis: A Coupled Classification Approach (Fuzzy-AHP/PCA-Kmeans) of Imadats

Hadil Houimli¹

¹ Carthage University, labo Villes Durables et Environnement Construit VDEC,
Tunisia hadilhouimligeo@gmail.com

Abstract. The study aimed to identify flood-prone areas in Greater Tunis and propose a classification method based on the Environmental Vulnerability Index (EVI) at the administrative level of "imadats" sectors. To achieve this, a Fuzzy-AHP/PCA-Kmeans approach was used, taking into account 10 flood-influencing factors. The results revealed that 4% to 26% of the Greater Tunis watershed were located in high vulnerability zones, with 282 sectors belonging to the high and very high-EVI groups requiring the highest level of attention. The study's findings have significant implications for urban management and the prevention of climate change-related risks. The proposed classification method can provide decision support to local authorities in flood risk management and urban planning. Furthermore, the study validated EVI maps against the 2003 floods, demonstrating the reliability of using remote sensing data and multi-criteria methods simultaneously. Future research should focus on extending this approach to other cities to better understand flood vulnerability factors and refine the proposed classification method. Overall, this study highlights the importance of understanding the spatial distribution of flood-prone areas and implementing effective management strategies to reduce the impact of flooding.

Keywords: Environmental Vulnerability Index (EVI), Fuzzy-AHP, PCA, k-means, Local Governance.

1. Introduction

Floods are one of the climate hazards with the greatest impact on people and the environment globally, especially in urban areas. The Greater Tunis region in Tunisia, where rapid urbanization has increased the risk of flooding, is a striking example of this problem. Research in this region highlights the persistent conflicts between economic development and environmental protection, where urban sprawl has developed at the expense of surrounding wetlands and agricultural plains. However, these studies of various scales [Govender *et al.*, 2022; Feng *et al.*, 2021; Luo & Zhang, 2022], despite all their attempts to take into account the phenomenon of urbanization and the control and prevention of flood risks, highlight gaps in the local governance of flood risk management, especially in Tunisia. This weak decentralization, which is due not only to the limited capacities of local agents, but also to the inertia of the State, to the centralization of the management policies of certain services as well as to the limited financial resources, has a deficit in disaster risk management at the local level, leading to a delay in the establishment of risk prevention and mitigation measures in local communities

By filling this emerging gap, the study proposes a classification method at the administrative level of "imadats" sectors according to the environmental vulnerability index (EVI), based on a coupled rational approach (Fuzzy-AHP/PCA-Kmeans). This method calculates the EVI in each imadat, determines the most vulnerable sectors and provides a basis for urban planning and

management to mitigate future risks. Finally, the research highlights the importance of local governance of environmental vulnerabilities in flood risk management.

1. Methods and Materials

a. Study Area

Grand Tunis, the capital and metropolitan area of Tunisia, covers only 2% of the country's surface but is home to 24% of its population. The region's development has been influenced by physical constraints such as hilly terrain, large bodies of water, and a dense hydrographic network. However, this location also puts the area at risk of flooding, especially as the Mediterranean region is a climate change hotspot. Grand Tunis is divided into four governorates, 48 delegations, and 334 imadats (see Fig. 1.), which is the smallest administrative unit in Tunisia.

[OCDE, 2019; INS, 2021; MTE-DGAT, 2011; Weber & Puissant, 2003;Giorgi, 2006

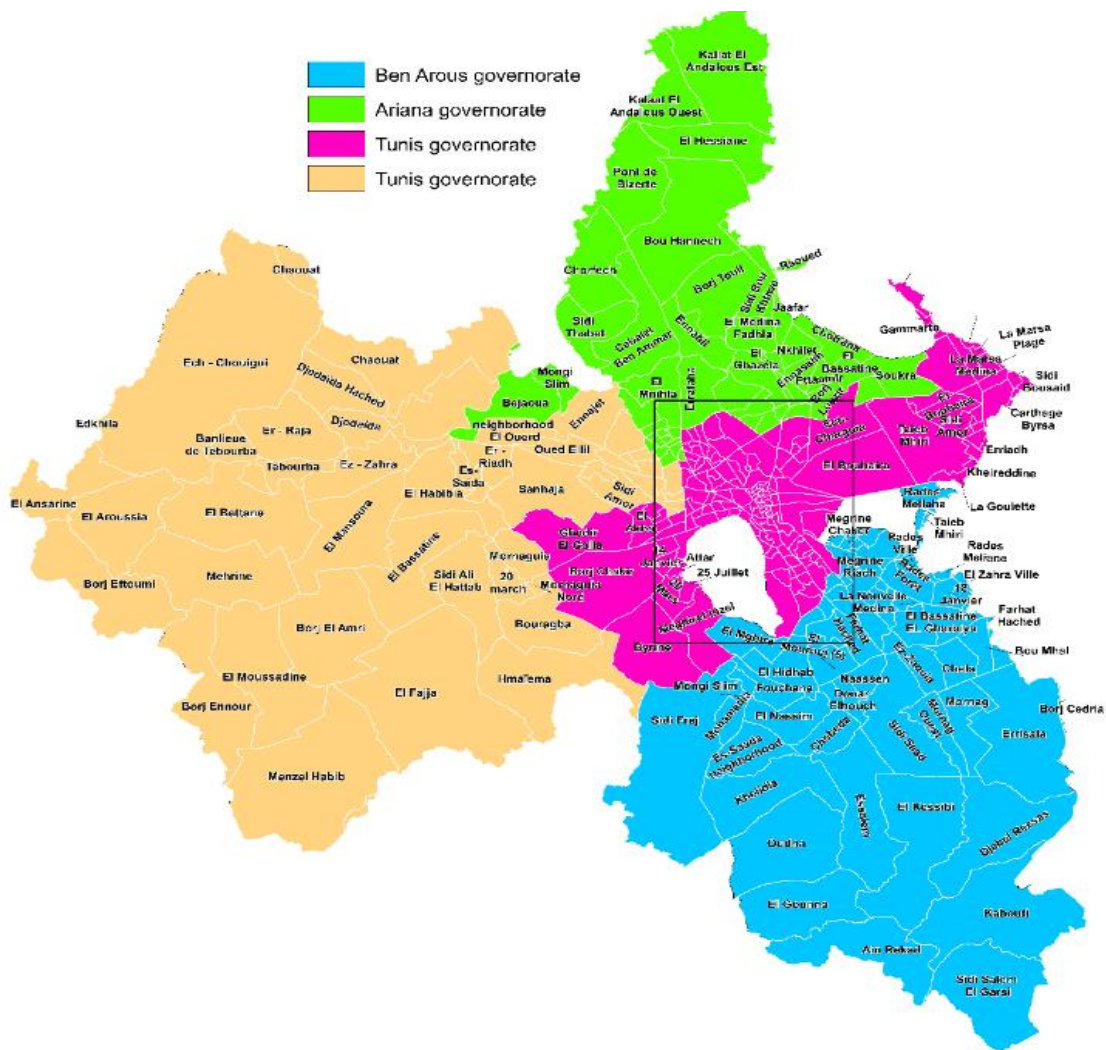


Fig. 1. Administrative division of study area.

b. Datasets

In this study, an Environmental Vulnerability Index EVI map was created for the study area using ten factors. These factors include Topographic Wetness Index (TWI), Elevation, Slope, Precipitation, Land use/Land cover (LULC), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), distance from river, distance from road, Drainage density, and Soil permeability. These factors are further described in detail below.

TWI

The Topographic Wetness Index (TWI) is a useful tool for identifying flash-flood-prone areas in a given study site. It is calculated as the natural logarithm of the ratio between the specific catchment area and the slope (1). The TWI has been successfully applied in the early stages of land use planning for residential development in Inverloch. Although it has limitations, TWI can be used in the early stages of planning.

to identify problem areas before decisions about land use change or drainage system improvements are made. Additionally, topography is the main factor that controls waterflow, as noted by Besnard et al. (2013) (see Fig .2. , a).

$$TWI = \ln \left(\frac{\alpha}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

Elevation

Elevation plays a crucial role in flood susceptibility (see Fig2, b). Residents in highly urbanized downstream regions are more sensitive to flooding than those living in the upper regions of the watershed. Urban streams, especially those in low-lying areas, are more prone to frequent flooding, degraded water quality, and loss of aquatic habitat. Furthermore, with an increase in elevation in mountainous areas, precipitation tends to increase, which can also contribute to an increased risk of flooding [*Khosravi et al., 2016*].

Slope

Slope plays a crucial role in determining the direction and amount of surface runoff and subsurface drainage reaching a site. It is a dominant factor in the contribution of rainfall to stream flow and controls the duration of overland flow, infiltration, and subsurface flow. Therefore, assessing the impact of slope on runoff rates is essential (see Fig .2. , c). The designated slope classes used in the assessment of the two watersheds showed considerable proportions of the area under all classes, highlighting the importance of considering slope information in evaluating hazard vulnerability. Unplanned development of residential areas along rivers and the absence of adequate drainage systems are among the significant factors contributing to inundation and flooding [*Bisht et al., 2018*].

LULC

Urbanization can have a significant impact on land use properties, leading to decreased flow resistance and infiltration capacity (see Fig .2. , e). This can result in increased stormwater runoff volumes and flow rates, which can exceed the capacity of drainage systems. These changes in land use are often driven by demographic and socio-economic factors, such as population growth and urban expansion. Climate change may also exacerbate these issues.

As a result, flooding has become a major concern for many small and rapidly developing cities. Flood damage is often attributed to population density, which can exacerbate the effects of urbanization on hydrological and hydraulic processes. Without additional investment in these areas, flood damage is likely to persist. Land use is a crucial factor in regulating infiltration, runoff, interception, and evaporation. Urbanization in river and channel zones can significantly reduce drainage capacity, leading to increased flooding in urban areas [Willems, 2012].

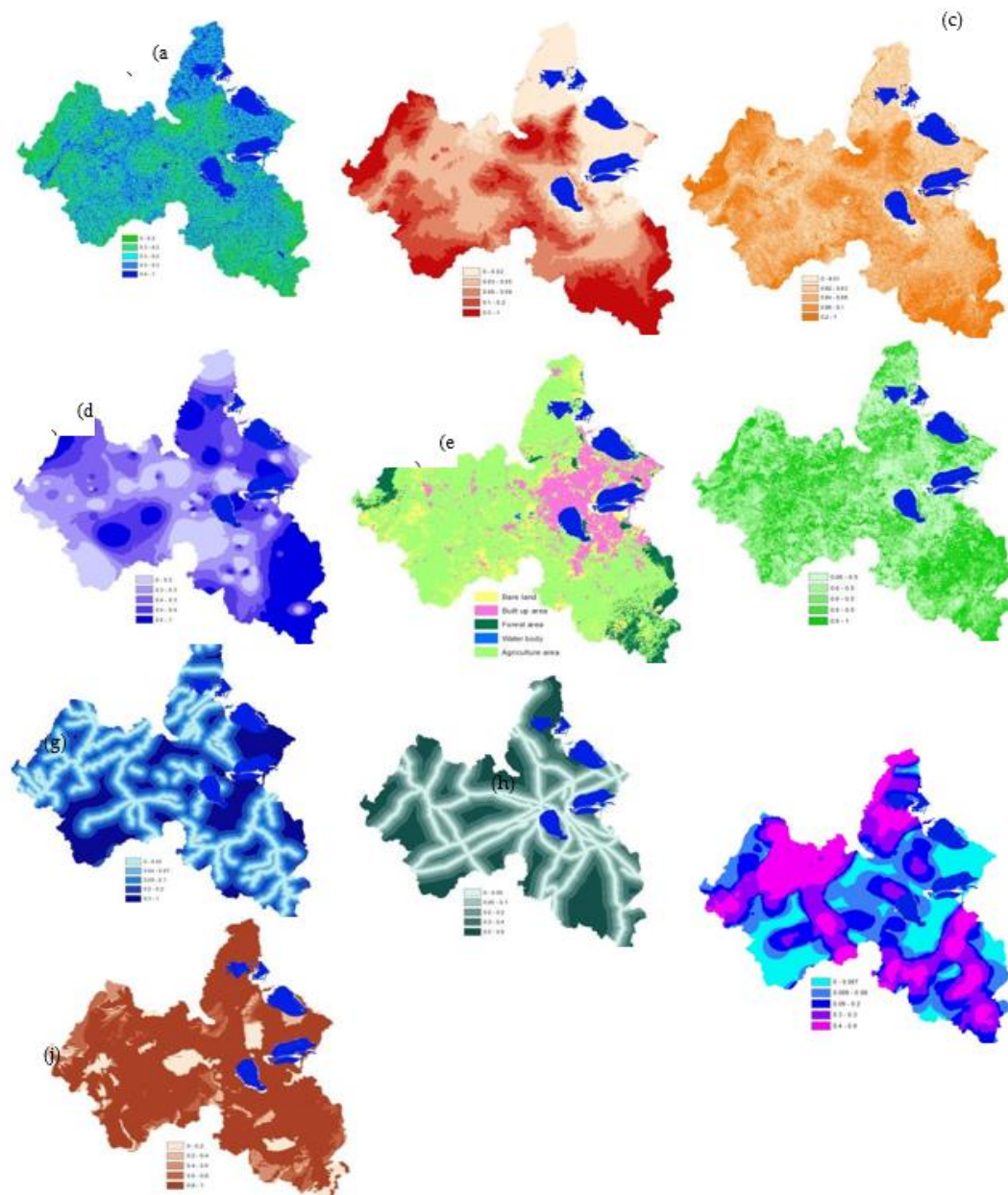


Fig. 2. The factors /maps which were used in the proposed flood hazard system: (a) Topographic Wetness Index (TWI), (b) Elevation, (c) Slope, (d) Precipitation, (e) Land Use/Land Cover (LULC), (f) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), (g) Distance from river, (h) Distance from road, (i) Drainage density and (j) Soil permeability.

NDVI

The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is widely used to assess vegetation cover and density, and it is also an important factor in determining flood susceptibility. NDVI is a remote sensing index that can effectively distinguish between water and dry land areas, calculated by analyzing the ratio between near-infrared and red reflectance values from satellite imagery Landsat 8. However, a high NDVI value does not necessarily guarantee prolonged water concentration in the area, so to identify water harvesting sites, both the Topographic Wetness Index (TWI) and NDVI were utilized together [Berhanu & Bisrat, 2018].

Distance to streams

Distance to streams is a crucial factor affecting the level of flood sensitivity in the study area. Generally, areas closer to the riverbanks are more vulnerable to floods (see Fig2,g). The proximity to streams map was created based on the hydrographic network using the Euclidean distance tool in the GIS environment. In the case of the study area, the adjacent parts of the main river are more vulnerable to flash floods. This is consistent with the records of flooding events in Grand Tunis, which suggest that communities living near riverbanks and channels are the most vulnerable to floods [Arabameri et al., 2019].

Distance to roads

Distance to roads is a critical factor in assessing waterlogging susceptibility in urban areas (see Fig2, h) Roads play a significant role in urban expansion and have considerable impacts on human activities, the environment, and socioeconomic development. However, roads and streets are impermeable surfaces that quickly generate runoff and inundate during floods, making areas close to them more vulnerable to flooding. In addition, the distance from roads is an essential determinant of flash flood susceptibility. High-density road networks slow down the infiltration process, preventing water from entering the ground and leading to flash flood situations during light rain events. To assess the risk of waterlogging, the distance to roads must be taken into account, as it is an important indicator of flood susceptibility in urban areas [Xu et al., 2022].

Drainage density

Drainage density is a critical morphometric parameter that plays a significant role in determining the hydrological complexity of the surface and subsurface (see Fig2, i) Our study revealed that most areas have low drainage density, resulting in a reduced runoff rate and an increased likelihood of flooding. As a result, drainage density was identified as one of the key contributing factors to flood hazard in our analysis.

The lineament map was analyzed by calculating the total length of lineaments per unit area (in square kilometers) using the formula given in equation (2)

$$L_d = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_i}{A} \quad (2)$$

Where, $\sum_{i=1}^{i=n} L_i$ is the sum of the lineament segment lengths, and A is the unit area (Km^2).

The drainage system of the study area was mapped out by utilizing the ArcHydro Tools available in ArcMap 10.5. The SRTM Digital Elevation Model (DEM) was used as input data for the process. After delineation of the drainage map, the drainage density was obtained by calculating the total length of river segments per unit area (Km^2).

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} D_i}{A} \quad (3)$$

Where, $\sum_{i=1}^{i=n} D_i$ represents the sum of the drainage segment lengths, and A is the unit area (Km^2) [Alam et al., 2022].

Soil Permeability

Permeability of the underlying surface plays a critical role in the occurrence of urban floods. Building and hardened surfaces impede rainwater infiltration. Studies show that an increase in permeability from 0 to 60% reduces the risk of flooding. While most research on urban floods relies on model simulations, few studies investigate flooding by controlling the permeability of the underlying surface. The risk of flooding increases faster for areas with a permeability of 0-35% than those with 35-60%. A highly permeable top layer of soil can reduce runoff, as moisture is absorbed vertically through the ground. Conversely, a low-permeability soil layer retains most of the rainfall on the surface, leading to runoff [Xu et al., 2022].

c. Methodology

After preparing different input datasets, The proposed approach illustrated in Fig. 3. consists of three main steps, which are: (1) the application of Fuzzy-AHP, (2) the application of Principal Component Analysis (PCA), and (3) clustering using k-means.

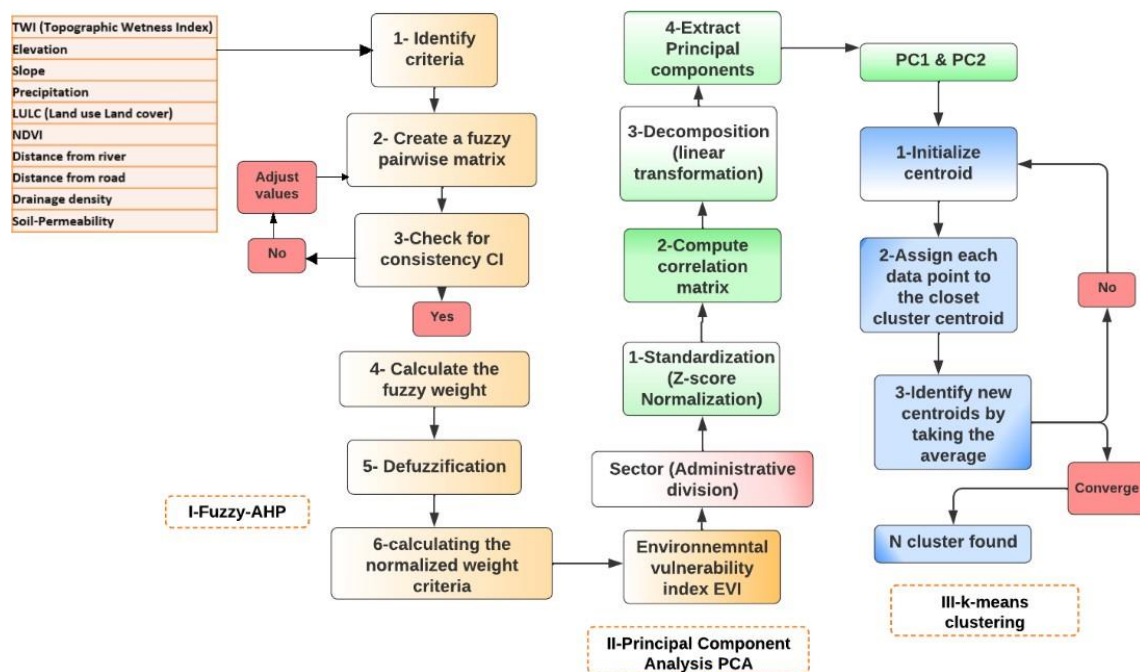


Fig. 3. Flowchart of Methodology

The Fuzzy-AHP method is a hybrid decision-making model that aims to handle uncertainty and vagueness in the decision-making process. This method applies the AHP to consider expert knowledge and then improves it by incorporating fuzzy membership values to quantify preferences. In this approach, fuzzy logic theory is utilized, which applies fuzzy set theory [Zadeh,

1965].to represent and calculate the degree of membership of each criterion without rigid boundaries based on the degrees of truth. Fuzzy set membership values range between 1 (full membership) and 0 (non-full membership), where the membership of a particular class gradually transits into another class, providing a continuous scale of real numbers between 0 and 1. The assignment of the membership values of each sub-criteria in the fuzzy set theory is determined using equation [Zadeh, 1965].

In this section, we present the F-AHP method that was developed. The procedure used in the proposed method is described as follows:

The **first step** in the F-AHP method is to define and identify the criteria that represent the environmental vulnerability factors, mentioned in These criteria serve as the basis for the decision-making process and should be chosen based on their relevance and ability to represent different aspects of the problem.

In step 2, The fuzzy pairwise comparison process is used to assess the relative importance of the selection criteria, which leads to the creation of a fuzzy reciprocal judgment matrix, which it is presented in Table 1

Table 1. Fuzzy pairwise matrix

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	
(a)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(4,5,6)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	
(b)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	
(c)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(0.33,0.5,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	
(d)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,2,3)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	
(e)	(0.25,0.33,0.5)	(0.33,0.5,1)	(0.25,0.33,0.5)	(0.25,0.33,0.5)	(1,1,1)	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	
(f)	(0.16,0.2,0.25)	(0.25,0.33,0.5)	(1,1,1)	(0.33,0.5,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(0.16,0.2,0.25)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	
(g)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,2,3)	(0.33,0.5,1)	(2,3,4)	(4,5,6)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	
(h)	(0.25,0.33,0.5)	(0.25,0.33,0.5)	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)	(0.25,0.33,0.5)	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	
(i)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	
(j)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	
Sum	(7.66, 7.86, 8.25)	(7.83, 8.16, 9)	(9.25, 7.66, 11.5)	(7.16, 7.66, 9)	(13.25, 18.33, 23.5)	(17, 21, 25)	(6.99, 8.36, 10.25)	(15, 20, 25)	(10, 10, 10)	(10, 10, 10)	(10, 10, 10)

In Step 3, Check for consistency

To ensure consistency in a fuzzy pairwise comparison matrix in Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy-AHP), we need to calculate the Consistency Ratio (CR) and the Consistency Index (CI). First, we calculate the maximum eigenvalue (λ_{max}) of the fuzzy pairwise comparison matrix and use it to calculate the CR using the formula: $CR = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$, where n is the number of criteria. We then determine the Random Index (RI) from a pre-calculated table [Saaty, 1980] based on the number of criteria and calculate the CI using the formula: $CI = CR / RI$. Finally, we compare the calculated CI with the expected value of CI for the given number of criteria. If the calculated CI is greater than the expected CI, the matrix is inconsistent, and we may need to revise the pairwise comparisons until the consistency is achieved by adjusting the pairwise comparison values or revisiting the criteria to ensure they are correctly defined and compared.

The fuzzy set theory is used, which it is introduced by Zadeh (1965), is a mathematical approach to deal with uncertainty and vagueness in decision-making processes. It allows representing imprecise data using fuzzy numbers, which can be further processed in the fuzzy domain through mathematical operations. Fuzzy numbers are represented by membership grades ranging from 0 to 1, with triangular fuzzy numbers (TFN) M (Fig. 4.).

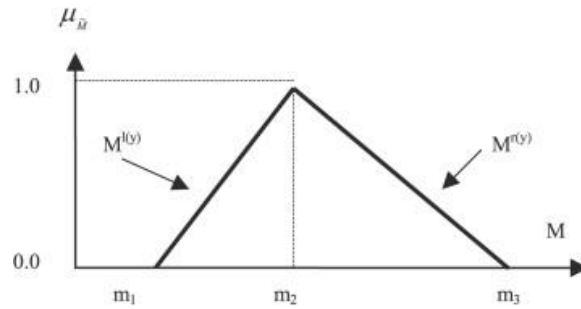


Fig. 4. A triangular fuzzy number, M

A triangular fuzzy number (TFN) is defined as $(m_1=m_2; m_2=m_3)$ or (m_1, m_2, m_3) which denotes pessimistic, most likely, and optimistic values. The TFN having linear representation on left and right side can be defined in terms of its membership function as [Kahraman et al., 2003].

$$\mu(x | \bar{M}) = \begin{cases} 0 & , x < l \\ (x - m_1)/(m_2 - m_1) & , l \leq x \leq m \\ (m_3 - x)/(m_3 - m_2) & , m \leq x \leq u \\ 0 & , x > u \end{cases} \quad (4)$$

The fuzzy set values can be obtained by applying the linguistic triangular fuzzy scale, which combines linguistic variables and Triangular Fuzzy Numbers (TFN). In this study, the TFN scale used for the analysis ranged from one to nine, as in Saaty's scale of importance [Saaty, 1980]. The TFN scale is a widely used method for assigning fuzzy numbers to evaluate criteria in decision-making processes [Bajaj & Arora, 2013].

The geometric mean method was used in the second step to calculate the fuzzy weights for each factor. This method involves taking the geometric mean of fuzzy comparison values for each criterion, which is then used to determine the fuzzy weight. The formula for the geometric mean method is given by Buckley (1985) and involves several calculations using fuzzy values.

The Buckley's geometric mean method follows eqs. (4) and (5) below [Buckley, 1985].

$$\begin{aligned} \tilde{r}_i &= (a_{i1} \otimes a_{i2} \otimes \dots \otimes a_{in})^{1/n} \\ &= (l_1 \times l_2 \times \dots \times l_n)^{1/n}, (m_1 \times m_2 \times \dots \times m_n)^{1/n}, (u_1 \times m_2 \times \dots \times m_n)^{1/n} \quad (5) \\ \text{and then } \tilde{w}_i &= \tilde{r}_i \otimes ((\tilde{r}_i \otimes \dots \otimes \tilde{r}_n)^{-1}) \end{aligned}$$

The resulting fuzzy weight is then used in the decision-making process for each criterion. The resulting fuzzy weight is displayed in the Table 2.

Table 2. Table captions should be placed above the tables. All captions are centered.

Fuzzy geometric mean value	Fuzzy weights W_i	Fuzzy weights W_i	Normalized weights
(1.319,1.463,1.578)	(0.112, 0.146, 0.208)	0.466	0.137747561
(1.071,1,335,1,430)	(0.091, 0.112, 0.188)	0.391	0.115577889
(0.959, 1.041, 1.148)	(0.081, 0.104, 0.151)	0.336	0.09932013
(1.148, 1.430, 1.643)	(0.097, 0.143, 0.217)	0.457	0.135087201
(0.550, 0.668, 0.870)	(0.046, 0.067, 0.115)	0.228	0.067395803
(0.540,0.605,0.707)	(0.045, 0.061, 0.094)	0.2	0.059119125
(1.181, 1.463, 1.761)	(0.100, 0.147, 0.232)	0.479	0.141590304
(0.5, 0.574, 0.707)	(0.042, 0.058, 0.094)	0.194	0.057345551
(1,1,1)	(0.084, 0.100, 0.132)	0.316	0.093408218
(1,1,1)	(0.084, 0.100, 0.132)	0.316	0.093408218
(7.587, 9.974, 11.844)	Sum not normalized	3.383	1

Step 5 involves defuzzifying the fuzzy weight using the average weight criteria $M(6)$, to obtain a crisp value.

This process is also known as defuzzification.

$$M_i = \frac{\widetilde{w}_1(+)\widetilde{w}_2(+)\dots(+)\widetilde{w}_n}{n} \quad (6)$$

Step 6 involves calculating the normalized weight criteria N_i using Equation (7). The weight values for each criterion are normalized using a specific formula to obtain the normalized weight (8).

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, N_i = 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \text{ Where } M_i = \frac{|w_1+mw_1+uw_1|}{3}, N_i = 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

2.4 Environmental Vulnerability Index (EVI)

Environmental Vulnerability Index was calculated by overlaying the different thematic maps developed in the previous step (step 4) using the weights determined in step 3. Equation (shown below) was utilized to compute the final vulnerability index value by multiplying the weight of each thematic map by its corresponding fuzzy membership value, and then summing the products across all thematic maps for each area. The calculation was performed using the GIS software package ArcMap 10.5.

$$EVI = \sum_{n \in N} E W_n F M_n \quad (9)$$

where N is the set of thematic maps ($n \in N$), n represents a particular thematic map in N , $E W_n$ is the environmental weight of thematic map n , $F M_n$ is the fuzzy membership value for each pixel in the thematic map n .

2. Results

3.1 Assessment of Environmental Vulnerability Index (EVI)

The vulnerability criteria in our study were identified through previous scientific research on floods and considering the rainfall episode that occurred in September 2003, which affected the Grand Tunis at the scale of its sub-watersheds. Afterwards, the criteria were grouped into four main classes: topography, climatology, geology, and morphology. All sub-criteria were analyzed using the Analytical Hierarchy Process (AHP) and a fuzzification by triangular fuzzy number (Fuzzy-AHP) to weight them. We applied remote sensing (RS) and GIS, which are powerful and accurate methods in the field of flood monitoring, and which are very useful for detecting and mapping flood-prone areas. Fig .6. shows EVI map of the study area produced using the proposed methodology. The final fuzzy map was classified into four different classes by quantile classification.

The provided EVI maps indicated that 4% (AHP map) to 26% (Fuzzy-AHP map) of the Grand Tunis watershed was located in a high vulnerability rate. There was a high level of compatibility between the Fuzzy-AHP map and the 2003 flood map. The results demonstrated that the simultaneous application of remote sensing data and multicriteria methods can provide reliable results. We evaluated this similarity using the AUC curve, which confirmed the effectiveness of the Fuzzy-AHP method, with a AUC exceeding 65%

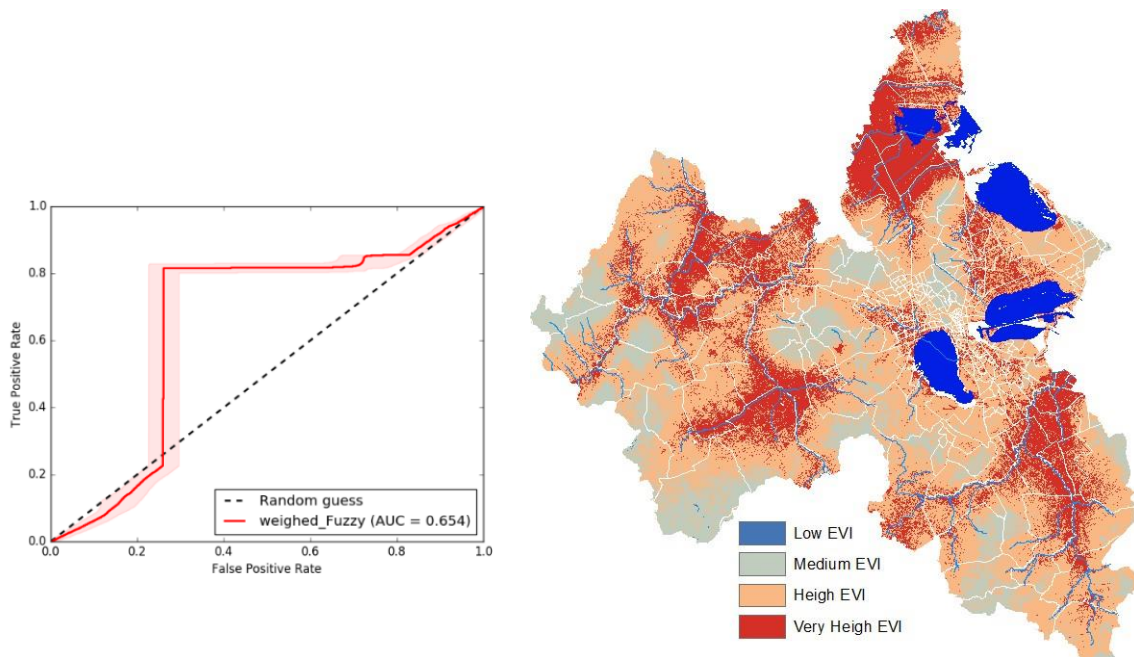


Fig. 5. Results of AUC curve.
EVI map.

Fig. 6. Environmental Vulnerability Index
EVI map.

3.2 Application of Principal component analysis (PCA)

Principal component analysis (PCA) is a widely used multivariate statistical technique developed by Pearson in 1901, which has been applied in various scientific fields including geology, chemistry, physics, biology, social and environmental sciences, and remote sensing applications [Pearson, 1901]. PCA transforms possibly correlated observed variables into a set of linearly uncorrelated variables, called principal components or axes, while reducing the dimensionality of multivariate data. K-means clustering is a popular statistical method for clustering data based on similarity [Sinaga & Yang, 2020]. and is commonly used in unsupervised learning [Ben Salem et al., 2018]. Applying the K-means algorithm in the PCA sub-space is more efficient for large datasets [Xu et al., 2015]. The Elbow method is commonly used to estimate the optimal number of clusters in K-means clustering, as it reveals the compatibility with the partial clustering algorithm, which needs to specify the number of clusters as an input parameter [Liu & Deng, 2021]. The steps of PCA-kmeans are shown in Fig. 3.

The proposed approach for developing an unsupervised classification of sectors based on the Environmental Vulnerability Index (EVI) involves the use of statistical techniques such as Principal Component Analysis (PCA) and K-means clustering by utilizing the R programming language for data exploration and analysis, the proposed method aims to aid in a rational approach to flood risk management planning for urban stakeholders. The classification method proposed selects vulnerable sectors that require rapid intervention in the event of sudden flooding, in terms of crisis management and combating rapid, unplanned urban expansion. The proposed method offers a means to identify potential risks faced by society and its projects and respond to those risks accordingly.

In the context of the Environmental Vulnerability Index (EVI), we are dealing with four continuous variables representing the vulnerability levels of different sub-watersheds: Low vulnerability, Medium vulnerability, High vulnerability, and Very high vulnerability. In our study, Principal Component Analysis (PCA) is used as an intermediate step and a data compression methodology [Yu et al., 2019] in which its results will be part of a subsequent analysis of clustering of 328 sectors into groups based on similar environmental vulnerability evaluations. The objective of this analysis is to control urban runoff and unplanned urban expansion in the metropolitan area of Grand Tunis, particularly in sectors identified as vulnerable.

Factor loadings

The Table 3 presents the factor loadings for the four Environmental Vulnerability Index (EVI) variables in the first two principal components (PC1 and PC2). The eigenvalues indicate the amount of variance explained by each PC, with PC1 explaining 31.92% of the total variance and PC2 explaining an additional 31.57%, for a cumulative percentage of 63.49%.

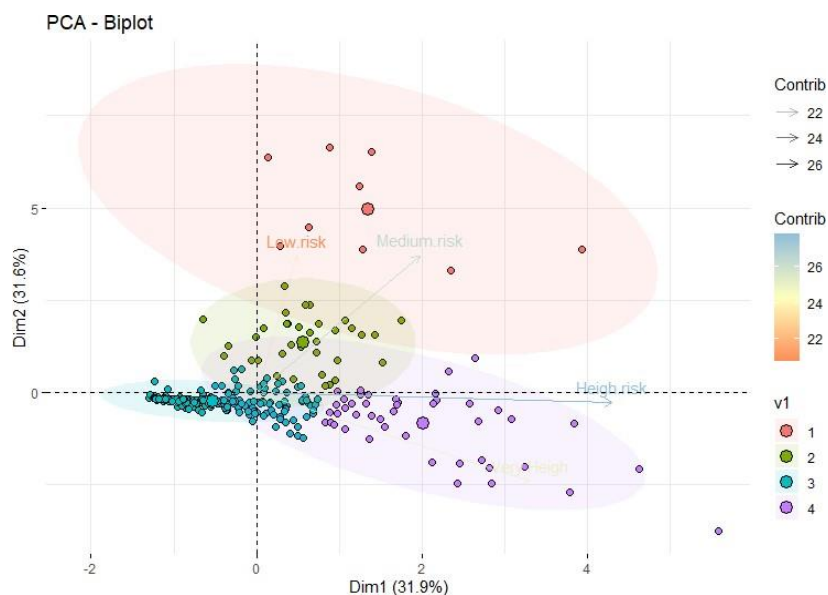


Fig. 7. Results of Principal component analysis (PCA)-based on k - means clustering

Looking at the factor loadings, we can see that Medium EVI has a strong positive correlation with both PC1 (loading of 0.34) and PC2 (loading of 0.643). Heigh EVI also has a strong positive correlation with PC1 (loading of 0.742) but a weak negative correlation with PC2 (loading of -0.047). Very Heigh EVI has a moderate positive correlation with PC1 (loading of 0.572) but a strong negative correlation with PC2 (loading of -0.416). Finally, Low EVI has a weak positive correlation with PC1 (loading of 0.084) and a strong positive correlation with PC2 (loading of 0.641).

These factor loadings indicate that the first two principal components capture different aspects of the environmental vulnerability index variables. PC1 is mainly driven by the medium and high EVI variables,

while PC2 is mainly influenced by the very high and low EVI variables. The results suggest that these two principal components could be used as a reduced set of variables for further analysis, as they capture a large percentage of the variance in the original data while reducing the dimensionality of the dataset.

Table 3. Loads of 4 variables in two principal components

Eigenvalues	1.277	1.263
Cumulative (%)	31.92%	63.49%
Variability (%)	31.92%	31.57%
Variables	PC 1	PC 2
Medium EVI	0.340	0.643
Heigh EVI	0.742	-0.047
Very Heigh EVI	0.572	-0.416
Low EVI	0.084	0.641

3.3. Clustering of Sectors based on EVI levels

The clustering section aimed to provide an overview of similarities and differences among sectors based on their Environmental Vulnerability Index (EVI) levels in Greater Tunis, using K-means clustering analysis. The PC1 and PC2 components served as input data for the K-means method, which was applied to 328 sectors, resulting in the formation of four distinct clusters (see Fig.7.). Cluster 1 consists of nine sectors with low EVI, primarily characterized by forested areas. Cluster 2 comprises sectors with medium EVI, predominantly including peri-urban areas with agricultural land dominance. Cluster 3 is the largest, consisting of 237 sectors displaying a mix of high and low EVI. It mainly encompasses residential and polyfunctional areas concentrated in the city center and suburbs of Greater Tunis. Cluster 4 is composed of 45 sectors with very high EVI, primarily located in areas designated for industrial and commercial activities. Sectors in Cluster 4 exhibit strong correlation with PC1. Overall, the clustering analysis sheds light on the distribution of EVI levels across the different sectors in Greater Tunis (see Fig.6.). However, it is crucial to note that the spatial dimension plays a pivotal role in this uneven distribution. Sectors classified as "Very High EVI" in Greater Tunis exhibit a distinct spatial dimension that renders them environmentally vulnerable. Their geographical distribution is uneven, with a significant concentration in several key regions of Greater Tunis. For instance, there is a notable concentration of "Very High EVI" sectors in the western area, covering Tebourba, Battane, and Borj el Amri in the Manouba governorate, as well as sectors in Sidi Thabet, Ghazela, and Raoued, which are in close proximity to each other. In the eastern and western areas of Tunis, areas such as el Akba, Manouba, Douar Hicher, and the Lake of Tunis also show a high density of these sectors. Furthermore, examples of sectors like Rades, Boumhal, Naassen, and Mornag illustrate this unequal geographical distribution. This uneven distribution can be attributed to several factors. Firstly, these areas are situated in geographically lower regions, rendering them more susceptible to flooding, particularly due to their proximity to wadis and lakes. The sectors of Manouba and Ben Arous are examples of regions where this spatial proximity significantly impacts their environmental vulnerability. Moreover, there is a prevalence of informal settlements in these vulnerable areas, particularly in the Ariana and Manouba governorates. These informal settlements contribute to soil impermeability, exacerbating flood risks and environmental vulnerability. The disregard for development plans further compounds the situation by encouraging unregulated land use. The "High" class follows a similar pattern of geographical distribution, with sectors primarily located in the central and peri-central areas of Greater Tunis. For example, sectors such as Menzah and Manar in the north, Kabaria, Djebel Jloud, and Ez-zouhour in the west, and expansion into the northern and southern suburbs, including areas like La Marsa, Carthage, and Rades. This region is characterized by a polyfunctional use of land, including both residential and commercial activities. The urban density in "High" sectors in this central region is noteworthy, indicating a concentration of residential and polyfunctional activities. This geographical distribution is also influenced by factors such as topography and proximity to watercourses, albeit to a lesser extent than in the case of "Very High" sectors. As for the "Medium" and "Low" classes, they also exhibit an uneven geographical distribution, characterized by agricultural and forested areas, with higher elevation levels. Specific sectors in these classes include Ennahli in the north, Echouigui in the east, Djebel Ressay in the south, and Habibia in the west. These areas are distinguished by lower population density and a lower risk of flooding. Their geographical distribution reflects the varied topography of Greater Tunis and the predominance of agricultural and forested areas. These less densely populated sectors play a crucial role in preserving green spaces and contributing to the environmental diversity of the region.

4. Discussion

The study aimed to classify different sectors of the Grand Tunis metropolitan area according to their estimated risk of flooding due to the absence of local governance in managing urban territories prone to flooding. An integrated Fuzzy-AHP/PCA-Kmeans method was used to classify the territory into different groups based on 10 flood influencing factors. The results identified 282 sectors belonging to the high-EVI and very high-EVI groups, which require the highest level of attention. Although the study had some limitations, such as the lack of causality and the accuracy of the data used in the analysis, the study's strength lies in identifying the level of risk of flooding in different sectors, which could be useful in describing the hierarchy of needs at the Imada level. The study's findings also have significant implications for the Grand Tunis sectors that are particularly vulnerable to the effects of climate change. Therefore, it is essential that urban actors respond to Sustainable Development Goals (SDGs) 11 and 13 by 2030, in order to increase resilience to climate change and avoid future disasters. The study suggests, in the context of local governance, the method to decision-makers to take into account flood risk management in sector planning, given rapid urbanization, and to have a general emergency and intervention/prevention plan for each sector. The study recommends conducting further research on the hydrological impacts of future planning in Greater Tunis. It emphasizes integrating demographic, socio-economic, political, and institutional factors into this research. This integrated approach aligns with the findings of Santos et al. (2020) and is vital for tailoring specific recommendations for each EVI class. Implementing this integrated approach into urban planning allows for better control of urbanization. For example, in areas with "Very High EVI," strict land use regulations are needed to limit construction in flood-prone areas and promote flood-resistant infrastructure. In "High" sectors, promoting poly-functional land use reduces travel demands and environmental pressures, enhancing sustainability. In "Medium" and "Low" EVI areas, preserving agricultural and forested zones is essential for maintaining environmental diversity. This integrated approach supports environmental risk management and contributes to a sustainable urban environment, ensuring Greater Tunis's resilience and sustainability.

5. Conclusions

In conclusion, the study's results provide valuable insights into the spatial distribution of flood-prone areas in the Greater Tunis metropolitan area using a combination of remote sensing and multi-criteria analysis. The study identified 282 sectors belonging to the high and very high-EVI groups, which require the highest level of attention for flood risk management. These sectors are located in urban, suburban, and rural areas throughout the metropolitan region.

The study highlights the importance of considering multiple factors when assessing flood risk in urban areas, as the factors contributing to flood vulnerability vary across different sectors. The proposed method of using remote sensing data and multi-criteria analysis simultaneously can provide decision-makers with data-driven evidence to prioritize flood risk management measures in vulnerable areas. By providing a more comprehensive understanding of flood vulnerability factors at the sector level, the proposed method can help improve urban planning and management practices to reduce the impact of flooding and increase resilience to climate change.

However, addressing the challenges of flood risk management in the region requires effective governance at the local level.

Local authorities must be equipped with the necessary resources, expertise, and funding to implement effective flood risk management measures in the identified high-risk sectors.

This requires a coordinated effort between different levels of government, as well as engagement with stakeholders and the public to ensure that flood risk management strategies are effective, equitable, and

sustainable in the long term. Therefore, there is a need for a multi-stakeholder approach that involves collaboration among government agencies, community groups, and other stakeholders to develop and implement effective flood risk management strategies in the region.

References

1. Govender, T., Dube, T. & Shoko, C. Remote sensing of land use-land cover change and climate variability on hydrological processes in Sub-Saharan Africa: key scientific strides and challenges. *Geocarto International* 0, 1–25 (2022).
2. Fang, Z. et al. Evaluating the Impacts of Future Urban Expansion on Surface Runoff in an Alpine Basin by Coupling the LUSD-Urban and SCS-CN Models. *Water* 12, 3405 (2020).
3. Luo, K. & Zhang, X. Increasing urban flood risk in China over recent 40 years induced by LUCC. *Landscape and Urban Planning* 219, 104317 (2022).
4. OCDE. Améliorer les statistiques régionales pour un développement territorial inclusif et durable en Tunisie. (OECD, 2019). doi:10.1787/283fefef-fr.
5. Weber, C. & Puissant, A. Urbanization pressure and modeling of urban growth: example of the Tunis Metropolitan Area. *Remote Sensing of Environment* 86, 341–352 (2003).
6. Giorgi, F. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33, (2006).
7. Besnard, A. G., La Jeunesse, I., Pays, O. & Secondi, J. Topographic wetness index predicts the occurrence of bird species in floodplains. *Diversity and Distributions* 19, 955–963 (2013).
8. Khosravi, K., Nohani, E., Maroufinia, E. & Pourghasemi, H. R. A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. *Nat Hazards* 83, 947–987 (2016).
9. Bisht, S., Chaudhry, S., Sharma, S. & Soni, S. Assessment of flash flood vulnerability zonation through Geospatial technique in high altitude Himalayan watershed, Himachal Pradesh India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 12, 35–47 (2018).
10. Willems, P. Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage Systems. *wio* 11, (2012).
11. Berhanu, B. & Bisrat, E. Identification of Surface Water Storing Sites Using Topographic Wetness Index (TWI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). *Journal of Natural Resources and Development* 8, 91–100 (2018).
12. Arabameri, A., Rezaei, K., Cerdà, A., Conoscenti, C. & Kalantari, Z. A comparison of statistical methods and multi-criteria decision making to map flood hazard susceptibility in Northern Iran. *Science of The Total Environment* 660, 443–458 (2019).
13. Xu, T. et al. Permeability control and flood risk assessment of urban underlying surface: a case study of Run- cheng south area, Kunming. *Nat Hazards* 111, 661–686 (2022).
14. Alam, A., Paul, R. K., Khan, A., Satpati, L. & Ghosal, N. Dynamics River Networks and Determination of the Flood Potential in Lower Brahmaputra Valley Using Geoinformatics. in *Spatial Modelling of Flood Risk and Flood Hazards: Societal Implications* (eds. Pradhan, B., Shit, P. K., Bhunia, G. S., Adhikary, P. P. & Pourghasemi, H. R.) 77– 90 (Springer International Publishing, 2022). doi:10.1007/978-3-030-94544-2_5.
15. Zadeh, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control* 8, 338–353 (1965).
16. Saaty, T.L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York. - References - Scientific Research Publishing. [https://www.scirp.org/\(S\(1z5mqp453edsnp55rrgjt55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1943982](https://www.scirp.org/(S(1z5mqp453edsnp55rrgjt55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1943982).
17. Kahraman, C., Cebeci, U. & Ulukan, Z. Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP. *Logistics Information Management* 16, 382–394 (2003).

18. Bajaj, P. & Arora, V. Multi-person decision-making for requirements prioritization using fuzzy AHP. *SOEN* (2013) doi:10.1145/2507288.2507302.
 19. Buckley, J. J. Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems* **17**, 233–247 (1985).
 20. Pearson, K. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **2**, 559–572 (1901).
 21. Sinaga, K. P. & Yang, M.-S. Unsupervised K-Means Clustering Algorithm. *IEEE Access* **8**, 80716–80727 (2020).
 22. Ben Salem, S., Naouali, S. & Chtourou, Z. A fast and effective partitional clustering algorithm for large categorical datasets using a k-means based approach. *Computers & Electrical Engineering* **68**, 463–483 (2018).
 23. Xu, Q., Ding, C., Liu, J. & Luo, B. PCA-guided search for K-means. *Pattern Recognition Letters* **54**, 50–55 (2015).
 24. Liu, F. & Deng, Y. Determine the Number of Unknown Targets in Open World Based on Elbow Method. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **29**, 986–995 (2021).
 25. Yu, C.-H., Gao, F., Lin, S. & Wang, J. Quantum data compression by principal component analysis. *Quantum Inf Process* **18**, 249 (2019).
- Santos, P. P. *et al.* A comprehensive approach to understanding flood risk drivers at the municipal level. *Journal of Environmental Management* **260**, 110127 (2020)

AXE 2 : DROIT, GOUVERNANCE DURABLE DU CADRE BATI



Repenser le code d'urbanisme pour une approche durable – Pr. Afef Hammemi MARRAKCHI – FDS

« Le code d'urbanisme a survécu à trois constitutions. Il n'évolue pas et sans réforme il est en déphasage ce qui laisse des lacunes juridiques et des failles »

Pr. Afef Hammemi-MARRAKCHI a soulevé, lors de sa conférence, les problématiques liées à la législation tunisienne dans le secteur de l'aménagement du territoire et du bâtiment. En effet, selon elle, la réglementation reste en déphasage avec les besoins actuels et doit être repensée afin d'éviter les lacunes juridiques.

Pr. Hammemi-MARRAKCHI a présenté différents travaux relatifs au projet du code d'urbanisme que son laboratoire de recherche a entrepris avec l'appui de la fondation HBS. Le nouveau code d'urbanisme doit en effet prendre en considération les enjeux environnementaux. La décentralisation est aussi une donnée importante qu'il faut mettre en avant dans le nouveau code d'aménagement du territoire urbain CATU ainsi que dans le code des collectivités locales.

D'autre part, la spécialiste en droit de l'environnement a soulevé également l'absence d'approche genre dans le code des collectivités locales nécessaire pour parler d'une approche durable.

AXE 3 : TERRITOIRES ET URBANISME DURABLE



Vulnérabilité VS résilience urbaines et architecturales au Grand Tunis dans le contexte de changement climatique – Pr. Mahmoud Abdesselem – ENAU

‘Il faudrait adopter une politique urbaine basée sur le nouveau paradigme du développement durable qui répond effectivement aux Objectifs du Développement Durable’

Pr. Abdesselem est revenu, dans son intervention, sur l'évolution des usages des concepts de vulnérabilité et de résilience et sur la signification même des termes. Il affirme que l'on peut parler de vulnérabilité sur plusieurs échelles en partant de la vulnérabilité interne de la personne qu'à la vulnérabilité multidimensionnelle comprenant les aspects : physiques, socio-économiques, environnementaux et institutionnels.

Il a par la suite évoqué la structuration spatiale de l'urbanisme du Grand Tunis et son impact sur la vulnérabilité de la région. Le spécialiste en sociologie urbaine a mis l'accent sur l'étalement urbain prononcé de la région. Il a surtout insisté sur la vulnérabilité des régions côtières de par la hausse du niveau de la mer et le risque accru d'inondations dans certaines régions proches des étendues d'eau et dans les bassins versants.



**Penser l'urbain pour une meilleure durabilité – Dr.
Olfa Ben Medien – ISTEUB**

« Penser l'urbain pour une meilleure durabilité implique la promotion d'un savoir-faire et un savoir être durable »

Dr. Ben Medien a fait part d'une réalité contraignante : le mode de développement urbain est aujourd'hui une des principales causes des changements climatiques. Elle a par la suite présenté un état de l'art des différentes tentatives locales de guides d'urbanisme durable ainsi que les projets durables en cours. Nous citons notamment la charte du droit à la ville, le guide de l'écoquartier mais aussi l'activisme urbain et les tentatives de décentralisation. Elle a insisté sur la nécessité de proposer une réglementation flexible et des partenariats publics/privés. Elle a soulevé aussi l'importance de fédérer les efforts et la nécessité d'une sensibilisation citoyenne.

Dr. Ben Medien recommande également une réflexion basée sur notre héritage architectural et urbain et les bonnes pratiques internationales.

Generative design of urban morphology: optimization of solar access and densification

Laila KOUBAA TURKI ¹ and Abdelkader BEN SACI ²

¹ Univ. Carthage, ENAU, M2A team, Sidi Bou Saïd, Tunisia

² Univ. Grenoble Alpes, CNRS, ENSAG, AAU-CRESSON, 38000 Grenoble, France

Koubaa.leila@yahoo.fr

Abstract. Urban densification and solar gain are two major issues impacting the development of sustainable urban morphologies. This article proposes a generative design approach to the morphology of buildings that aims to be resilient and equitable by integrating the resources of the immediate context. We propose the solar envelope by shading exchange as an envelope derived from the Knowles solar envelope [1]. We propose a method guaranteeing both solar access and densification by exchanging shade between neighboring buildings. The model offers different density solutions by varying the rate of shading exchange.

We present the model and discuss the results of its experimentation on three neighboring plots. The results are encouraging for renewing urban morphological rules and proposing a passive densification strategy adapted to climate change.

Generative design by BIM approach offers new horizons for establishing a decision-making instrument based on the combination of solar access and urban densification.

It is a question of responding to a current problem seeking to optimize urban density and passive solar contribution by better exploiting the solar morphology and the resources of the immediate context.

Keywords: Solar access, urban densification, Shading exchange, Urban morphology, Generative design.

1 Introduction

The magnitude of energy expenditure due to the rapid growth of cities constitutes an axis of reflection on urban morphology. To reduce the energy consumption of buildings, many researches [2]–[6] focus on methods and approaches to achieve a sustainable urban morphology to passively reduce the energy expenditure of buildings.

Solar access is a crucial element of sustainable urban morphologies. The ecosystem of solar urban morphologies is part of two current areas: the digital transition and the energy transition. It makes it possible to obtain a balance between the solar energy received and the urban density. This is currently based on urban regulations in terms of maximum height, FSI³, FAR⁴ and prospects. The latter consider a static context of the surrounding environment. The development of generative design⁵ offers new horizons for establishing a decision-making tool based on the combination of

3 : Floor Space Index is a floor occupation coefficient corresponding to the ratio between the buildable floor area and the plot area.

4 : Floor Space Area is the ratio between the sum of the floor's areas and the plot area.

5 : Generative design is a technology that uses artificial intelligence and the computing power to express solutions that meet the different constraints of the creator.

solar access and urban densification. This couple would form the basis of sustainable urban densification.

The concept of the solar envelope described by Knowles between 1968 and 1971 [1], [7] proposed a morphological concept to guarantee solar right [8]; allow solar access to a building without shading its neighbors. The solar envelope describes a volumetry that does not shade the neighborhood at specific times. These moments, called the cut-off-time, define the period for which solar access is desirable. The shading is inscribed in a boundary, called the shadow fence, which defines the shadow projection boundary of the massing. The cut-off time and the shadow fence are the two constraints of the morphological definition of the solar envelope. Koubaa Turki and al.[9] created a the state of the art of the various works relating to the determination of these two constraints. The concept has undergone a great effort of formalization and digital development. Several studies have used the solar envelope as a device for assessing solar access to solar right [10]–[14]. Other work [10]–[16] has investigated its impact on other design factors such as the resulting urban density [8], [12], [17], [18]; energy capture [19], [20], outdoor [19], [20] and indoor [21]–[22] thermal comfort.

We note that the determination of the shadow fence is based on the prospects, the roads and the neighboring constructions. The prospect is currently determined by urban regulation. In the literature, the solar envelope is generated in a static context defined by the surrounding environment and uses existing urban regulations to define the location of the building.

We then wonder how to define an ecosystem of solar urban morphologies ensuring solar access to several buildings located on neighboring plots? How can we then take advantage of the digital advance of generative design to generate a digital model of solar morphology capable of managing the duality of maximizing urban densification and optimizing solar access on an urban block?

2 Solar envelopes by shadow exchange

To answer this problem, we propose a solar envelope by shading exchange. It is an envelope derived from the Knowles solar envelope which aims to maximize density and optimize solar access. it considers a set of buildings acting mutually on an urban block. The location of constructions is determined from the shading restriction prospect. The latter is the minimum distance of the set-back of a building from plot limit to restrict its shadow inside the plot during the cut-off time. This approach does not involve urban regulations but relies on the solar geometry in a given environment.

2.1. Location determination

We propose to define the shadow fence by restricting the shadow projection inside the plots. From a minimum or initial height, it is possible to deduce the location of the buildings. It is based on the shade restriction prospect, denoted Pr , which restricts the shade to the boundary of the plot such that:

$$Pr = h_0 * \cos \beta / \tan \alpha \text{ (meter)} \quad (1)$$

With:

Pr - the shading restriction prospect (m);

H_0 – the initial height of the facade (m);

α - the angle of the solar height (degree). α expresses time;

β - the angle between the normal of the facade and the projection of the solar vector on the ground (degree). β expresses the orientation of the facade.

We retain the maximum value of the shading restriction prospect during the shading cut-off time. This value guarantees that the building does not cast shade in winter outside the boundary of the plot during the desired solar access slot.

2.2. Determination of shadow fences by shadow exchange

After having deduced the location of the building, we propose to extend the shadow fence by a device to exchange the shade between the neighboring plots belonging to an urban block. The shadows of a building then vary between the boundary of the plot and the feet of neighboring buildings. Each plot agrees to receive part or all of the shadow cast by neighboring buildings. This involves increasing the heights from the initial definition height of the shading restriction and up to the height casting the shadow at the feet of the neighboring building (Fig.1).

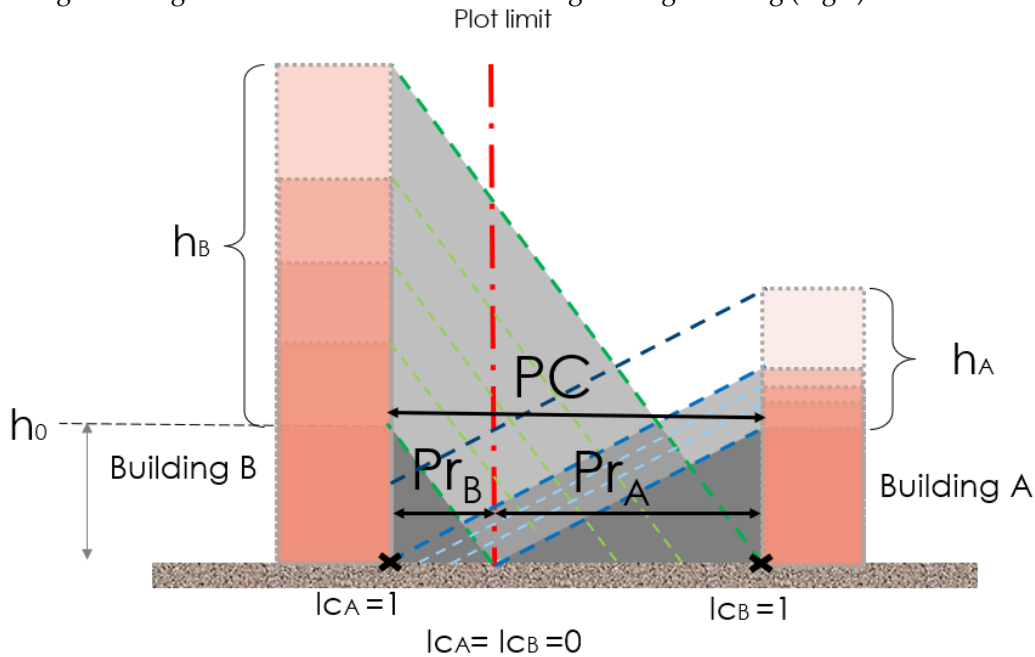


Fig. 1. Illustration shading exchange between two neighboring facades.

Starting from an initial situation of building location according to the shading restriction prospect, we define the cumulative prospect specific to each pair of opposite facades during the shading cut-off time. Its value depends on the shading restriction prospect retained for each orientation during the shading cut-off time.

We admit a cumulative prospect noted PC, equal to the sum of the shade restriction prospects of buildings A and B with:

$$PC = Pr_A + Pr_B \text{ (meter)} \quad (2)$$

This cumulative prospect by exchange of shading makes it possible to increase the height of buildings A and B. We propose a shading exchange index (denoted I_c) which corresponds to the rate of shading projected from the limit of the plot to the feet of the neighboring building. Let I_{cA} and I_{cB} be the shading exchange indexes of plots A and B respectively.

Let h_0 initial height and h_A and h_B be the height for an exchange of shading of buildings A and B with $h_A \geq h_0$ and $h_B \geq h_0$ such that:

$$Ic_A = \frac{(h_A - h_0) * \left(\frac{\cos \beta_A}{\tan \alpha_A}\right)}{Pr_B} \quad \text{and} \quad Ic_B = \frac{(h_B - h_0) * \left(\frac{\cos \beta_B}{\tan \alpha_B}\right)}{Pr_A} \quad (3)$$

If $Ic = 0$ then the shadow is restricted to the boundary of the plot.

If $Ic = 1$ then the shadow is restricted to the foot of the neighboring building

If $0 < Ic < 1$ then the shade varies between the boundary of the plot and the boundary of the neighboring building.

It is possible to admit $Ic > 1$ by integrating the height of the shadow fences on the facade of the neighboring building. For example, if we agree to shade the premises on the ground floor or part of the facade up to the window sills, in this case the shadow is restricted to a height h_i of the building opposite and exceeds the limit of the location at the level of the unbuilt space. It is necessary in this case to define the limiting condition of projection.

3. Experimentation

3.1 Methodology

We present an application example on an urban block of three plots (A, B and C) located in Lac of Tunis (Fig. 2).



Fig. 2. Satellite photo of the urban block composed of three plots A, B and C located at the Lac of Tunis (latitude 36°50'31.22"N, longitude 10°16'48.75"E).

We use the generative design approach to study the different urban density solutions by varying the shading cut-off time. We have developed an algorithm on Dynamo (Fig.3) to generate the solar envelope by shading exchange. The program makes it possible to detect the boundaries of the parcels imported from Revit, to calculate the shading restriction prospect, to determine the location of the building and to generate the restrictive solar envelope for each variation of cut-off time.

It also calculates the FAR and the FSI from the variation of the cut-off time for each parcel of the island.

We calculate the shading restriction prospect for each boundary of the plot and we deduce the volume generated by the restrictive shading location [24]. Then, we compute the solutions by shading exchange according to the variation of the shading exchange index I_c . Finally, we compare the solutions generated according to the urban density coefficients (FSI and FAR) and the solar access time.

The inputs are the location of the site, a time start cursor t_1 and a time end cursor t_2 of the shading cutoff time interval [10,15], the shading exchange is represented by a cursor of the shading exchange index which varies by a step of 0.25 in the interval [0,1]. The cross product of these parameters makes it possible to explore the all solutions.

The output results are the FAR and FSI index and the shading cut-off time duration.

Based on the Pareto principle, we propose that the time period retained in winter be around 20% of the hours of the day and correspond to at least 80% of the total irradiation [23]. So, we assume a shading cut-off time $T_o = [10h, 15h]$.

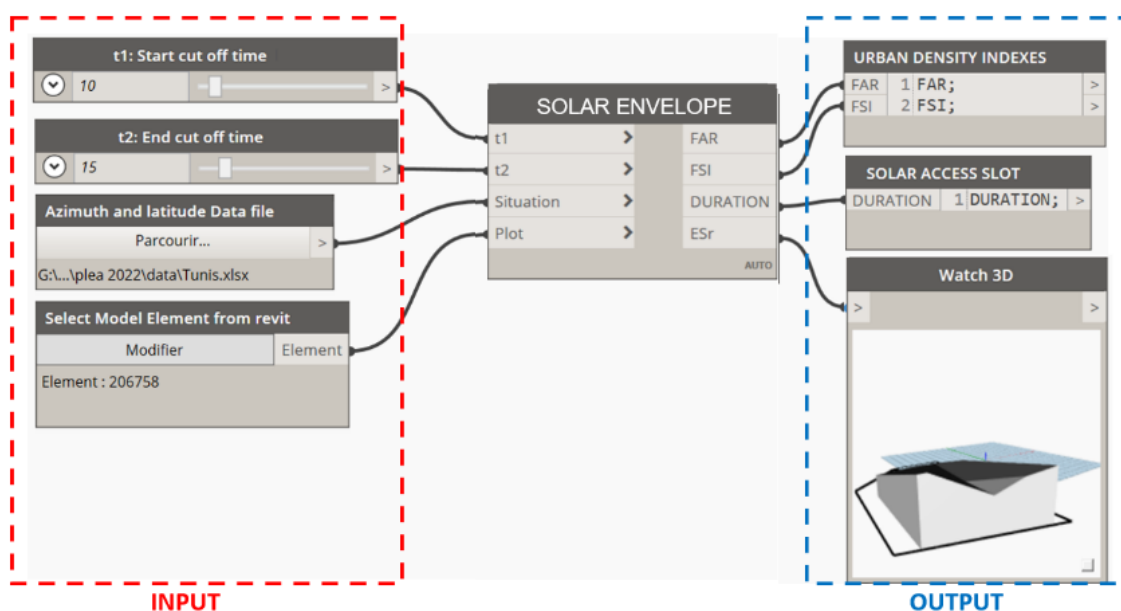


Fig. 3. Dynamo solar envelope component.

3.2 Results

We obtain 105 variants for each plot (Fig.4). The multidimensional representation below allows to see the implications for all the variables considered: time start, time end, shading exchange index, duration, FSI and FAR.

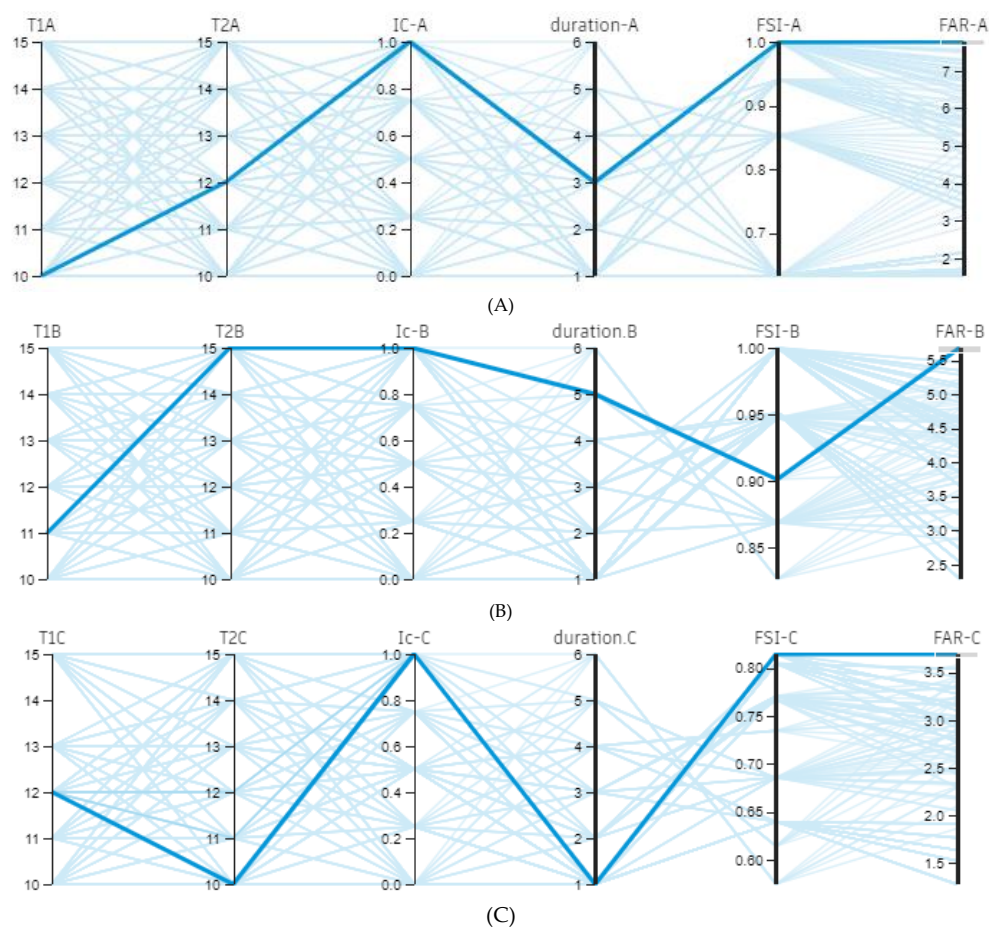


Fig.4. Parameters diagrams of solutions obtained for each plot (A, B, C) corresponding to the various urban density of shading cut-off time.

We propose two cases where the goals are to (1) maximize the FAR and (2) maximize the solar access duration. Indeed, we want to improve density and solar access.

Firstly, we examine the best solution that maximizes the FAR for each plot (Table 1).

Table 1. Results for a maximum FAR for the three plots.

	Plot A	Plot B	Plot C
Ic	1	1	1
FSI	0.99	0.901	0.814
FAR	7.777	5.685	3.693
Duration	3	5	1
Cut-off time	[10:00h,12:00]	[11:00,15:00]	12:00

We notice plot A has best result of FAR (7.777) with a gain of 26.8% and 52.51% compared to respectively plot B and plot C. Plot B can insure a maximum duration of solar access (5 hours).

Besides, plot C has a minimum FAR of 3.693 and minimum duration of solar access. The FSI results are nearly equal.

Secondly, we examine the maximum duration of cut-off time (6 hours of solar access) for the three plots (Table2). Plot B can achieve superior density results compared to Plot A and Plot C. Specifically, its FAR yields a 7% increase over Plot A and a 35.40% increase over Plot C, while its FSI results in a 23.6% improvement over Plot A and a 30.4% improvement over Plot C.

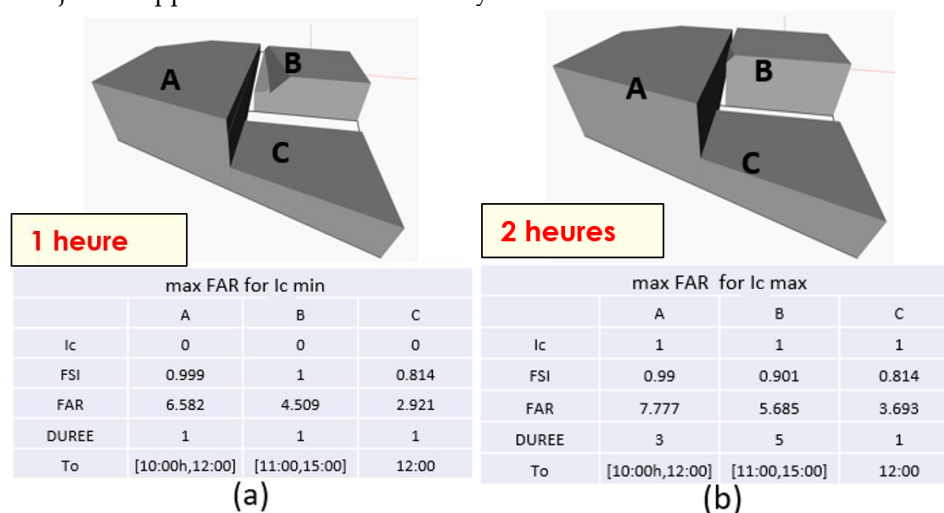
Table 2. Results for a maximum duration of shading cut-off time on the three plots.

	Plot A	Plot B	Plot C
Ic	1	1	1
FSI	0.632	0.827	0.575
FAR	4.018	4.324	2.793
Duration	6	6	6
Cut-off time	[10:00,15:00]	[10:00,15:00]	[10:00,15:00]

4. Discussion

This paper proposes a resilient approach to optimize urban density and solar access by studying the optimal duration and FAR. It proposes a method for determining urban morphology by controlling the solar access duration. Varying the period of the shading cut-off time makes it possible to explore different urban densities (Fig.5) while guaranteeing solar access over a useful solar access time slot.

The aim of this approach is to exploit the solar morphological potential of each plot. The position, shape and size of the plot impact the FAR and the solar access duration. The study of the maximum FAR and the duration of solar access makes it possible to obtain the best solutions for each plot. The multi-objective approach would be necessary in this case.



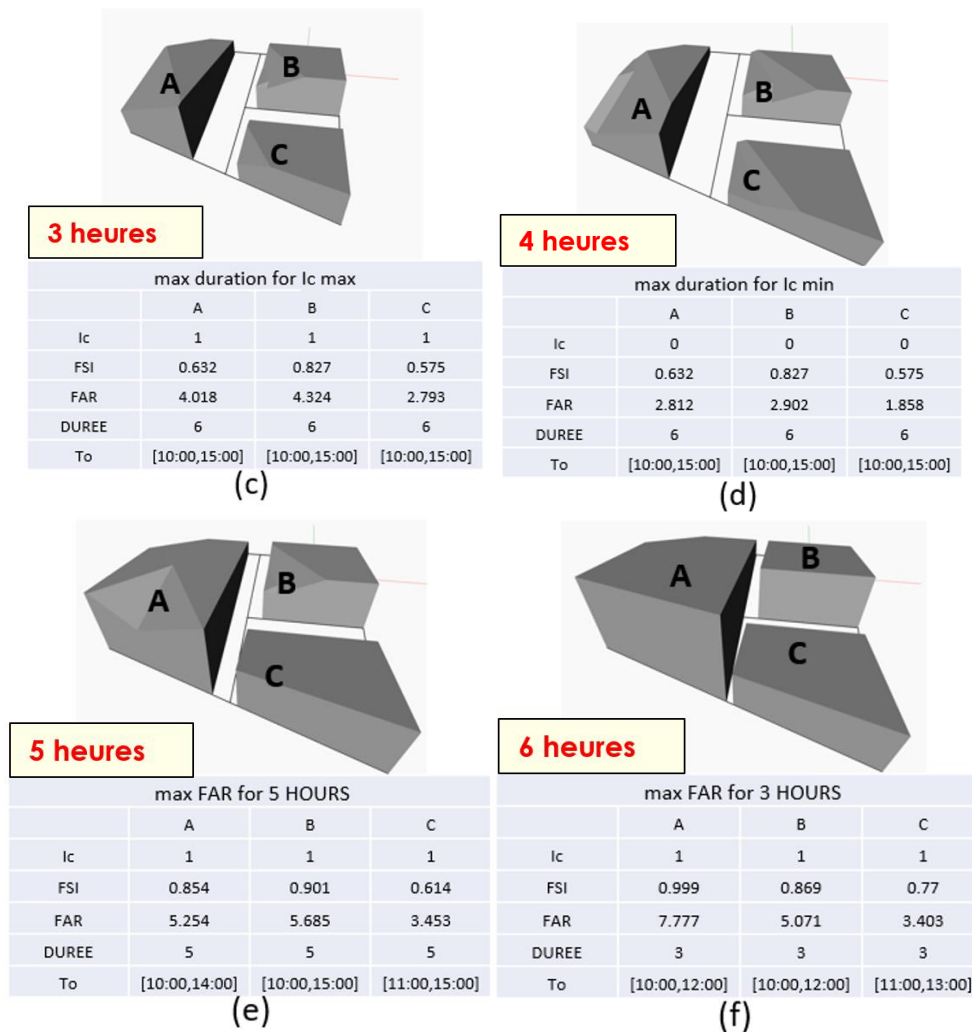


Fig.5. Examples of solar envelope generation for a one-hour increment of solar access.

The model makes it possible to maximize the FAR from minimum Ic (Fig.5-a) to maximum Ic (Fig.5-b). Plot A has maximum FAR (7.777) with a duration of 3 hours of solar access. Besides, the maximum FAR B is 5.685 with 5 hours of solar access. While plot C allows only one hour of solar access with the less FAR of 3.693.

To maximize the duration of solar access, from minimum Ic (fig. 5-d) to maximum Ic (fig. 5-c), plots A, B, and C all enhance their FAR by approximately 30%.

For maximum duration and maximum Ic (fig.5-c), plot A doubled its duration of solar access and its FAR compared to maximum FAR study (Fig.5-b). Besides, plot B has one additional hour of solar access impacting its FAR with a reduction of 23.9%. Plot C has 5 additional hours of solar access but its FAR decreases only of 24.37%.

By unifying the solar access duration to 5 hours of solar access (Fig.5-e), A and C show a loss of 32.44% and 6.4% in FAR compared to the maximum FAR study (Fig.5-b).

For 3 hours of solar access (fig.5-f), B and C show a loss of 10.8% and 7.85% in FAR compared to the maximum FAR study (Fig.5-b).

We retain in Fig. 6 the minimum, average and maximum values of the shading exchange index for a maximum of FAR. We compare the variation of FAR, FSI and solar access duration as a function of the shading exchange index for the three plots.

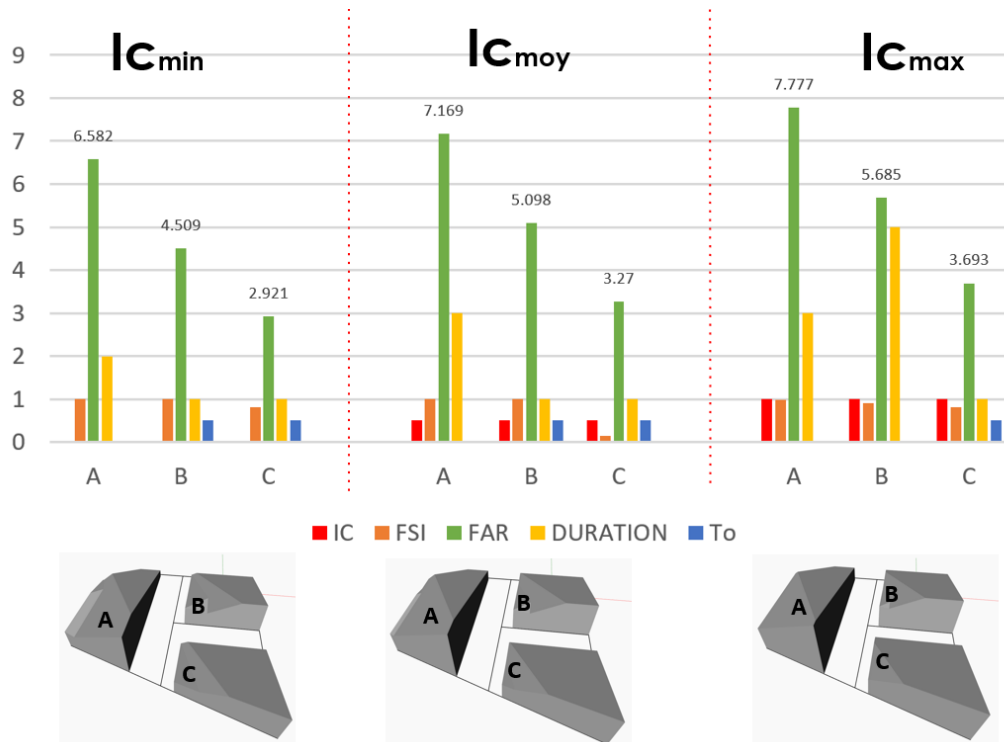


Fig.6. Maximum FAR by variation of the shading exchange index.

The maximum FAR of plot A varies from 6.582 to 7.777 with a duration varying between 2 and 3 hours of solar access. The maximum FAR of plot B varies from 4.509 to 5.685 with a duration varying between 1 and 5 hours of solar access. Besides, the maximum FAR of plot C varies from 2.921 to 3.693 with only one hour of solar access.

Between Ic from 0.5 to 1 (corresponding to a shading limit between half of the prospect of the neighboring plot and a limit at the foot of the neighboring building) the duration of solar access remains stable at three hours for plot A, one hour for plot C. Besides, plot B gains 4 hours of solar access. In the other hand, the FAR of plots A, B and C increase respectively by 7.8%, 10% and 11.45%.

The comparison of the results obtained with the current urban regulation of Tunis shows a clear improvement by using this model. We notice that this approach improves the maximum height indicated by the urban regulation. It can increase until 30m (Fig.7) compared to 17m as indicated by the actual urban regulation. The model allows to build higher buildings with restrictive shadow approach. This strategy optimizes the distribution of shade between neighboring buildings in winter. This allows to increase the FAR for between 46% (for plot B) to 53% (for plot A).

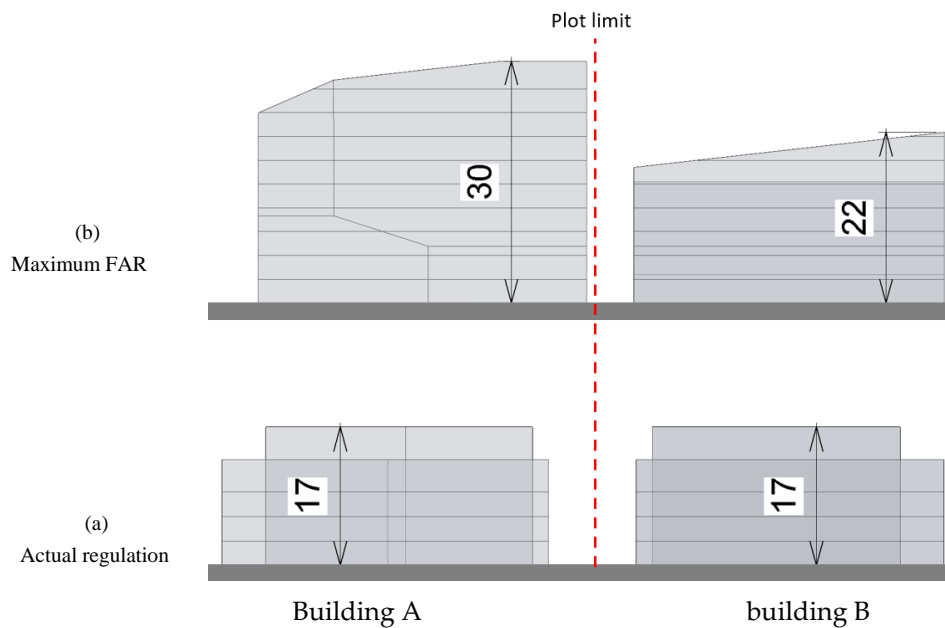


Fig.7. Height of buildings:(a) actual regulation and (b) for maximum FAR.

We evaluate the solar energy for the generated solar envelopes. We calculate the solar energy received on them at the shadow cut-off time for winter and summer (Table 3).

Table 3. Solar energy received on the solar envelope with maximum FAR in Winter and summer at the shadow cut-off time (kWh/m²).

	Winter	Summer
Plot A	98	187
Plot B	98	191
Plot C	101	185
A+B+C	99	186

We notice that Plot A and plot B have the same energy in winter (98 kWh/m²) but plot B has an excess of 2% in summer compared to plot A. Plot C has 3% more energy in winter than A and B. Besides, in summer it has the less exposure. It represents the best solution for energy balance point of view.

5. Conclusion et perspectives

This paper aims to improve shadow fence determination to better meet current expectations for solar access and density. We propose to define the location of constructions by the shade restriction prospect. The latter makes it possible to initially limit the shadow projection to the boundary of the plot. Shade swapping extends the shade fence between neighboring parcels. This makes it possible to increase urban density while guaranteeing solar access. The proposed model increases the FAR for about 50% compared to the actual regulation. Comparing to the initial volume with a cut-off time of [10:00, 15:00], the FAR of the three plots increases about 60%. Besides, the received energy in summer decreases for 13%, 7% and 12% respectively for plot A, B and C.

The model offers a decision-making tool for establishing urban rules respecting solar rights and increasing urban density.

The proposed approach makes it possible to guarantee better use of the solar resource on building envelopes. Plot C has 3% more energy in winter than A and B. Besides, in summer it has the least exposure. It represents the best solution from an energy balance point of view with a ratio $R_{d_h} / R_{d_e} = 0.545$. The model seeks to optimize urban density and passive solar gain by better exploiting solar morphology. We have calculated here the solar energy received by the envelopes a posteriori. However, we can consider this variable as a parameter to select the best urban morphology. The study of the maximum FAR and energy received according to the shading cut-off time makes it possible to obtain the optimal solutions for each plot.

In this research, the location is determined in a restrictive way. The shading restriction requires fairly large leads. The mutualization of prospects is an interesting way to minimize this distance. Each building accepts the shadow of its neighbor and gains in buildable surface area on the ground. This further optimizes urban densification and solar access.

References

- 1 R. Knowles, "The Solar Envelope," vol. 2 Solar L, p. Rep. 263, 298, 1980.
- 2 V. Cheng, K. Steemers, M. Montavon, and R. Compagnon, "Urban Form , Density and Solar Potential," no. September, pp. 6–8, 2006.
- 3 T. Vermeulen, C. Knopf-Lenoir, P. Villon, and B. Beckers, "Urban layout optimization framework to maximize direct solar irradiation," *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 51, 2015, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2015.01.001.
- 4 A. Jyoti, "High rise morphologies : architectural form finding in a performative design search space of dense urban contexts," in *In Computational Ecologies: Design in the Anthropocene, Proceedings of the 35th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, 2015, pp. 451–467.
- 5 R. Ma, T. Wang, Y. Wang, and J. Chen, "Tuning urban microclimate: A morpho-patch approach for multi-scale building group energy simulation," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 76, p. 103516, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103516>.
- 6 R. Loeffler, D. Österreicher, and G. Stoecklechner, "The energy implications of urban morphology from an urban planning perspective – A case study for a new urban development area in the city of Vienna," *Energy Build.*, vol. 252, p. 111453, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111453>.
- 7 R. Knowles, *Energy and form : an ecological approach to urban growth*. Massachusetts: MIT Press, 1974.
- 8 G. Casabianca, J. M. Evans, and S. Schiller, "Solar right and planing codes," 1991.
- 9 L. Koubaa Turki, K. Raboudi, and A. Ben Saci, "L'enveloppe solaire : un retour vers le futur," in *Actes SCAN'20 - 9e Séminaire de Conception Architecturale Numérique (Volume 82, 2020)*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20208201002>.
- 10 F. Pereira, C. Silva, and B. Turkienikz, "A methodology for sunlight urban planning : a computer-based solar and sky vault obstruction analysis," *Sol. Energy*, vol. 70, no. 3, pp. 217–226, 2001, doi:

- [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00094-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00094-3).
- 11 A. Marsh, "Computer-Optimised shading design," in *Proceedings of IBPSA 2003 Conference*, 2003, pp. 831–838.
 - 12 Z. Kristl and A. Krainer, "Site layout as a function of shading in Karst region," in *Proceedings of PLEA2005 Conference*, 2005, pp. 1097–1102.
 - 13 C. Martin and G. Keeffe, "The Biomimetic Solar City : Solar Derived Urban Form using a Forest growth Inspired Methodology," 2007.
 - 14 D. Pérez and É. Fávero, "O envelope solar como instrumento deregulamentação do direito de acesso ao Sol : estudo de casos na cidade de Campinas SP, Brasil," *Vasa*, pp. 1–15, 2008, [Online]. Available: <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>.
 - 15 I. G. Capeluto, A. Yezioro, T. Bleiberg, and E. Shaviv, "From computer models to simple design tools : solar rights in the design of urban streets," in *Proceedings of IBPSA 2005 Conference*, 2005, pp. 131–138.
 - 16 E. Morello, V. Gori, C. Balocco, and C. Ratti, "Sustainable Urban Block Design through Passive Architecture A tool that uses urban geometry optimization to compute energy savings," 2009.
 - 17 R. Knowles, "The solar envelope: its meaning for urban growth and form," *Energy Build.*, 2000, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00076-2.
 - 18 E. Assis, R. Souza, J. Grosch, and L. Ramos, "Integração do conceito de envelope solar na legislação urbana integração do conceito de envelope solar na," 2007.
 - 19 P. Santiago, "Otimização Evolutiva De Forma Para Sustentabilidade , Cruzando O Bim E a Modelação," 2016.
 - 20 C. Ratti and E. Morello, "SunScapes : extending the 'solar envelopes' concept through 'iso-solar surfaces,'" *Proc. PLEA2005 Conf.*, 2005.
 - 21 T. Sorayaei and Z. Sorayaei, "An Integrated approach to Climate Conscious Urban Design Using Solar Envelope Concept," *Palma J.*, vol. 16, no. 3, pp. 322–330, 2017.
 - 22 I. G. Capeluto and B. Plotnikov, "A method for the generation of climate-based, context-dependent parametric solar envelopes," *Archit. Sci. Rev.*, vol. 60, no. 5, pp. 395–407, 2017, doi: 10.1080/00038628.2017.1331334.
 - 23 L. Koubaa Turki, K. Raboudi, and A. Ben Saci, "Stratégies de prospect du droit solaire par l'immersion," in *Immersion - émergence et conception de projets architecturaux et urbains : Actes du 8ème Séminaire de Conception Architecturale Numérique. Actes de SCAN 18*, 2018, vol. 47, pp. 1–11, doi: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701014>.
 - 24 L. Koubaa Turki and A. Ben Saci, "Generative design for an urban morphology based on solar access strategy," in *PLEA 2022*, 2022, pp. 3–4.

Effets de la morphologie urbaine et de la végétation sur l'environnement thermique. Cas de la ville chaude et aride de Ghardaia, Algérie

Rachid AMIEUR^{1,2}, Djamilia ROUAG-SAFFIDINE², Christiane WEBER³

¹Université Amar Telidji Laghouat, Algérie

²Laboratoire Energie et Environnement, Université Constantine 3, Algérie

³UMR TETIS, Maison de la Télédétection, Montpellier, France

r.amieur@lagh-univ.dz

Résumé. L'îlot de chaleur urbain (ICU) engendre des risques majeurs sur la santé des populations et provoque une dégradation de la qualité de vie en milieu urbain et impacte le bien-être des citoyens notamment dans les régions chaudes et arides. La caractérisation de l'îlot de chaleur urbain dans les villes chaudes et arides permet une meilleure compréhension des effets de la morphologie urbaine et la végétation sur l'environnement thermique extérieur. L'objectif de cette étude est la caractérisation de l'ICU et l'étude des effets de la morphologie urbaine et de la végétation sur les conditions thermiques dans la ville chaude et aride de Ghardaïa en Algérie. La recherche est basée sur une campagne de mesure in situ le long d'un parcours urbain. Les résultats montrent des variations intra-urbaines notables en matière de température d'air s'élevant à 6°C. L'étude a révélé l'existence d'un « archipel » de chaleur à travers la ville. L'intensité maximale de l'ICU est de 2.9 °C. L'effet rafraichissant maximal de la végétation (PCI) est de 5.6 °C. Les résultats montrent aussi que la morphologie urbaine influe fortement le comportement thermique des espaces urbains. L'ouverture au ciel (SVF), le profil et l'orientation des rues sont parmi les facteurs déterminants. Durant le jour, la faible ouverture au ciel, le profil profond des rues ainsi que les canopées des arbres offrent des espaces protégés et ombragés pour les piétons. Cependant, durant la nuit, le profil très profond des rues et la géométrie complexe du bâti (faible SVF) empêchent la dissipation rapide de la chaleur emmagasinée durant le jour. La grande capacité thermique des matériaux de construction conduit au stockage d'une grande quantité énergie. La création d'une morphologie urbaine offrant de l'ombre tout en étant bien ventilée est recommandée dans les régions chaudes et arides. De même, il est conseillé de densifier les espaces verts pour en créer une "ville-oasis". Les arbres à planter devraient avoir des couronnes larges et hautes afin de favoriser la ventilation nocturne.

Mots clés : ICU (Ilot de Chaleur Urbain), Morphologie urbaine, climat chaud-aride, végétation, Ghardaïa.

Abstract. Urban heat island (UHI) has negative impacts on population and environment, especially in hot arid regions. Urban heat island characterisation is a key issue for understanding urban morphology effects on outdoor thermal environment in hot arid cities. The present study aims to characterize the UHI and study urban morphology and vegetation effects on outdoor thermal environment in the hot arid city of Ghardaïa in Algeria. The research was conducted by in-situ measurements along an urban transect. The results show inter-urban microclimatic variations displaying the heterogeneity of urban sites. The thermal behavior of measurement sites varies between urban heat island and cool island. The study exhibits an "archipelago" of heat throughout the city. The maximum intensity of UHI is 2.9 ° C. The maximum cooling effect of vegetation was 5.6 ° C. The results show also that urban morphology greatly impact the thermal behaviour of urban spaces. Sky View Factor (SVF), canyon geometry and orientation are among key parameters. By day, low SVF, deep canyons and tree canopies provide shaded spaces for pedestrians. However, by night, deep canyons and complex urban geometry limit dissipation of diurnal stored heat. Great heat capacity of urban materials lead to more stored energy. Designing shaded well-ventilated urban spaces is a crucial issue in planning hot arid cities. As well, it is recommended to densify urban green spaces in the aim to create an "oasis-city". High-spread canopy tree species must be selected to afford shade and allow nocturnal ventilation.

Key words: UHI (Urban heat island), urban morphology, hot-arid climate, vegetation, Ghardaïa.

1 Introduction

Le réchauffement climatique planétaire et le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU) provoquent et amplifient les problèmes environnementaux dans les villes. L'ICU entraîne une dégradation de la qualité de vie en milieu urbain et impacte le bien-être des citoyens notamment dans les régions chaudes et arides (Potchter et Ben-Shalom, 2013). Les températures estivales extrêmes engendrent des risques majeurs sur la santé des populations, en particulier les personnes à risque (âgées, malades et enfants) (Harlan et al., 2006). Les chaleurs caniculaires impactent aussi les activités humaines particulièrement celles exercées dans les espaces extérieurs sous des climats chauds. A titre d'exemple, le travail dans les chantiers de construction et de voiries est souvent très pénible avec un rendement fortement diminué (Givoni et Noguchi, 2000).

La caractérisation de l'ICU dans la ville chaude et aride de Ghardaïa permet une meilleure compréhension des effets de la morphologie urbaine et la végétation sur l'environnement thermique extérieur. La méthodologie est basée sur une campagne de mesure in-situ des principaux paramètres micro-météorologiques. L'analyse de la relation entre les températures des sites et leurs caractéristiques permet la mise en évidence de l'effet de la forme urbaine et de la végétation sur leur comportement thermique.

1.1 L'ICU dans les régions chaudes et arides

L'urbanisation provoque une altération du climat local. La température de l'air, l'humidité et la vitesse du vent interagissent avec les éléments de la ville comme les bâtiments, les rues, la végétation, etc. Ces changements provoquent le phénomène d'ICU qui se caractérise par une élévation des températures dans la ville par rapport aux zones rurales environnantes. L'ICU est le résultat de plusieurs facteurs citant entre autres : le piégeage de la chaleur et le stockage de l'énergie dans les matériaux de construction à cause de la complexité de la morphologie urbaine ; la chaleur anthropique et la pollution générées par les activités humaines ; l'imperméabilisation des surfaces (toits des constructions, pavage, asphalte, etc.) ; le faible albédo des surfaces en ville ; la raréfaction des plans d'eau et la végétation, etc.

L'ICU provoque de graves problèmes de qualité de l'air, une grande consommation d'énergie due à la climatisation et accentue les chaleurs caniculaires en été. Les études montrent qu'aux moments des vagues de chaleur le taux de morbidité et de mortalité lié à la température augmente significativement (Harlan et al., 2006). La vague de chaleur d'août 2003 qui a causé le décès de milliers de personnes en Europe en est un exemple frappant (Hémon et al., 2003). Les fortes chaleurs dans les villes à climat chaud et aride affectent aussi gravement le secteur économique notamment le tourisme.

L'ICU dans les climats chauds et arides présente des particularités en comparaison aux climats froids, tempérés ou équatoriaux. Dans les villes à climats froids, tempérés ou équatoriaux, la zone rurale est constituée principalement de forêts ou de prairies. Dans les climats chauds et arides en revanche, les alentours désertiques de la ville sont dépourvus de végétation. Par le passé, l'oasis formait une tâche de verdure dans le désert et était toujours adjacente à la ville qui elle, était dépourvue de végétation. De nos jours, la ville désertique contemporaine renferme en son sein de la végétation urbaine et reste plus végétalisée que son environnement désertique (Bensalah et al., 2018 ; Ben Shalom et al., 2009). Les villes désertiques, appelées ksour (pluriel de ksar) dans la région du Maghreb arabe, sont des entités bâties caractérisées par un tissu dense et compact. Le ksar est souvent bâti sur un monticule pour des raisons défensives, ce qui donne à la ville la forme étagée de ses habitations. Le système de voirie est souvent labyrinthique formé par des ruelles et impasses. La hauteur des ruelles est plus importante par rapport à sa largeur ce qui lui confère un profil profond. La géométrie des ruelles répond à plusieurs considérations : la protection contre le soleil ardent de l'été, la protection contre les vents de sable, etc. Les villes contemporaines se sont développées selon des nouveaux modes d'urbanisation qui contrastent avec le schéma urbanistique ancestral des noyaux originels (les ksour). La circulation mécanique impose des larges voies.

Néanmoins, les profils peu profonds des rues dans les nouvelles villes ou extensions n'offrent pas de protection suffisante contre la rudesse du climat. La morphologie urbaine et la végétation offrent de l'ombre pour les piétons dans l'espace urbain et un abri contre les vents violents alors que le désert est complètement dégagé et exposé à l'ardeur du soleil. Les températures d'air sont plus basses le jour, au sein de la ville. Cette situation conduit à la formation d'un îlot de fraîcheur urbain (IFU) en journée dans les villes chaudes et arides (Garcia-cueto et al., 2007).

La nuit, la ville manifeste un ICU si le SVF est faible et si le piégeage de chaleur dans l'environnement bâti est important. La rugosité aérodynamique réduit la ventilation et l'évacuation de la chaleur à l'extérieur de la ville. Par rapport aux villes à climats chauds et arides, Sofer et Potchter (2006) ont rapporté un ICU d'une intensité de 1.7 °C à d'Eilat ville chaude et aride, et Beer-Sheva, Potchter et al. (2011) quant à eux ont enregistré un ICU de 4 °C.

1.2 L'effet de la végétation

La présence de la végétation urbaine contribue à l'atténuation de l'ICU. La végétation améliore le microclimat à travers l'ombrage, l'humidification de l'air et son effet de brise-vent (Saaroni et al., 2018). L'effet rafraîchissant de la végétation est appelé "Parc Cool Island" (PCI). Saaroni et al. (2018) affirment que le PCI se situe entre 1.5 et 3.5 °C. Les arbres isolés ou les petits groupes d'arbres manifestent aussi un effet rafraîchissant. À Dubaï (Émirats Arabes Unis) Taleb et Taleb (2014) estiment que le végétal urbain réduit la température d'air de 2 à 6 °C.

Dans la ville désertique de Beer-Shev'a, Potchter et al. (2011) notent un effet rafraîchissant d'un groupe d'arbres de 1.5 à 3 °C en été. Au Caire, les sites végétalisés affichent un rafraîchissement de 6 K durant le jour (AboElata, 2017). Dans la ville chaude et aride de Mendoza (Argentine), Puliafito et al. (2013) relèvent un PCI maximal de 4 °C. Sur le plan énergétique, l'ombre de la végétation diminue considérablement la consommation d'énergie de climatisation des bâtiments. Il apparaît donc que le végétal urbain participe à l'atténuation du stress thermique et en particulier dans les villes à climat chaud et aride qui sont plus exposées aux aléas des ICUs.

2 Méthodologie et zone d'étude

L'étude est réalisée dans la ville de Ghardaïa située au nord du Sahara à 600 km au sud de la capitale Alger, dans la région du M'zab. Les ksour de la vallée du M'zab à Ghardaïa ont été classés patrimoine mondial par l'UNESCO en 1982. Le climat de la région est chaud et aride (Bkw) selon la classification de Koppen, connu par ses étés chauds et secs (Chen et Chen, 2013 ; Peel et al., 2007). La température moyenne en juillet est de 35 °C avec des maximums dépassant les 45 °C et des minimums de 27 °C (O.N.M., 2016 ; Bouchair, 2004). La zone d'étude couvre les quartiers du centre-ville de Ghardaïa y compris le ksar (le noyau historique).

Une campagne de mesure in-situ a été réalisée dans plusieurs sites à travers la ville (figure 1). Les sites de mesure ont été choisis de manière à représenter la diversité en matière : de morphologie urbaine, de présence de végétation, du niveau de fréquentation et des types d'activités, etc. (tableau 1).

Les sites de mesure forment une boucle le long d'un transect ou parcours urbain effectué en voiture en 20 minutes en moyenne (Chebli et al., 2020). Les paramètres microclimatiques relevés sont la température de l'air, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. La campagne de mesure s'est déroulée du 27 juillet au 04 août 2015. Les mesures sont effectuées trois fois par jour : à 05:00 h, à 14:30 h et à 00:00 h. Un site de référence a été choisi dans le désert, en dehors de la ville pour permettre le calcul de l'intensité de l'ICU et l'IFU (les écarts de température de l'air entre le point de référence et les sites mesures). Le PCI ou l'effet de rafraîchissement de la végétation est l'écart de température entre le site végétalisé et le site désertique de référence ou par rapport à un autre site urbain dépourvu de végétation (Saaroni et al., 2018 ; Bowler et al., 2010).

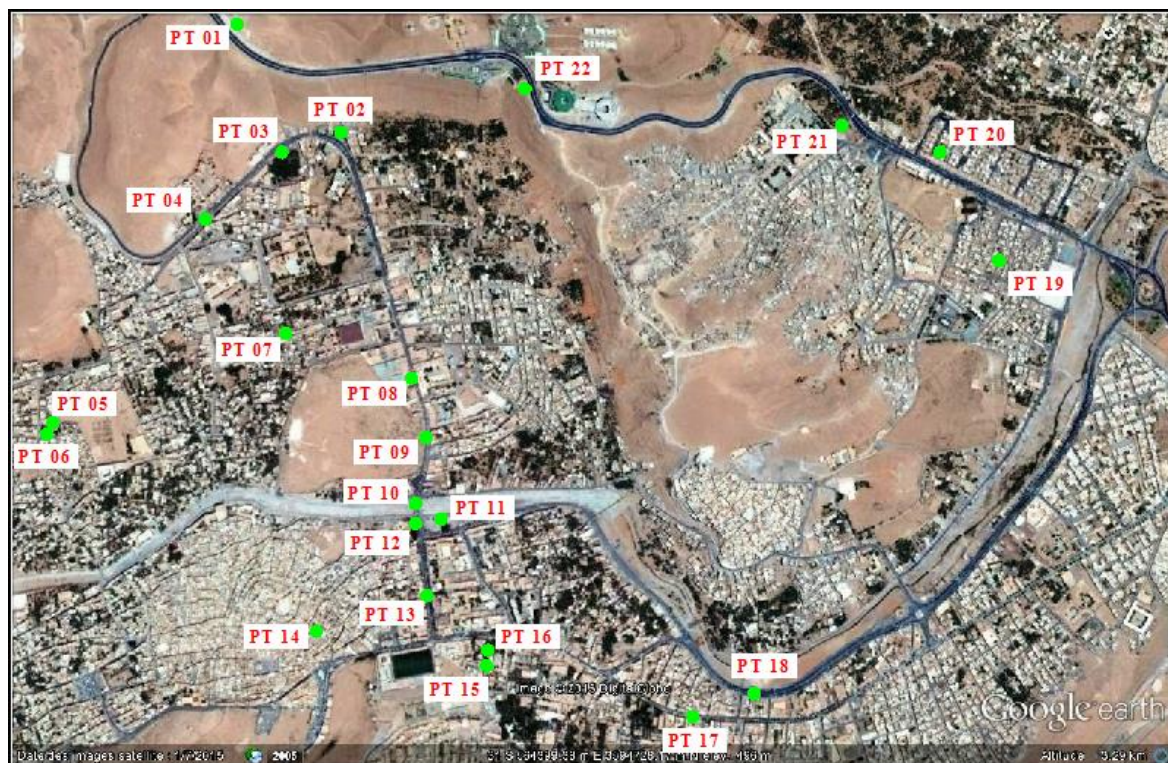
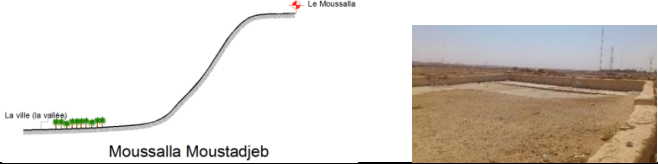
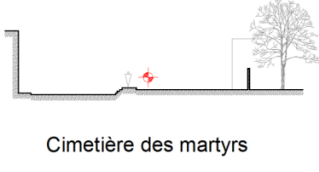
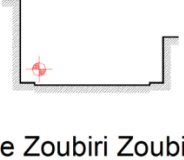
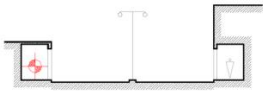
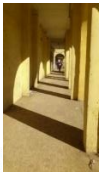

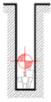

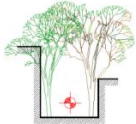


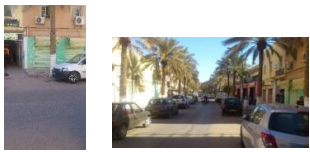
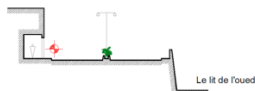

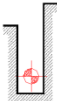






Fig 1 : Localisation des points de mesure dans l'aire d'étude (fond de carte : Google Earth).

Tab 1: Profil de quelques sites de mesure et description.

N° du point de mesure	Profil du site de mesure	Description
PT 01		<ul style="list-style-type: none"> - Trafic intense - Pas de végétation - Désert - Très Large SVF
PT 04		<ul style="list-style-type: none"> - Trafic intense - Très faible végétation - Sol en asphalte - Activité commerciale - Tissu contemporain - Large SVF
PT 07		<ul style="list-style-type: none"> - Trafic faible - Très faible végétation - Résidentielle - Orientation E/O - Sol en asphalte - Tissu contemporain

<p>PT 08</p>	  <p>Galerie Didouche Mourad</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic intense - Pas de végétation - Sol en asphalte - Orientation NE/SO - Activité commerciale - Tissu contemporain
<p>PT 13</p>	 <p>Boulevard Talbi Ahmed</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic intense - 03 rangées d'arbres - Sol en asphalte - Activité commerciale - Tissu colonial
<p>PT 14</p>	  <p>Ruelle du ksar</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic : motocycle et piétons - Pas de végétation - Sol en ciment - Habitat traditionnel - Tissu vernaculaire
<p>PT 16</p>	  <p>Rue Ibn Sina (sous la canopée)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic faible - Tunnel d'arbres - Sol en béton - Administration/habitat - Tissu colonial
<p>PT 17</p>	  <p>Boulevard 1er Novembre</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic intense - 02 rangées de palmiers - Sol en asphalte - Activité commerciale - Tissu colonial
<p>PT 18</p>	  <p>Boulevard de l'indépendance (5 juillet)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic intense - Faible végétation - Sol en asphalte - Activité commerciale - Tissu colonial
<p>PT 19</p>	  <p>Cité 20 août 1956</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic piétonnier - Pas de végétation - Sol en asphalte - Habitations - Tissu contemporain
<p>PT 20</p>	  <p>Cité 400 logements</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic faible - Pas de végétation - Sol en asphalte - Habitations - Tissu contemporain

Le point de mesure 

3 Résultats

Les mesures de température et d'humidité de l'air sont représentatives du climat de la ville en été (figure 2.). La température minimale nocturne est supérieure à 30 °C, révélant le degré du stress thermique subi par les habitants. Durant le jour, le site du cimetière des martyrs (PT04) manifeste le plus important ICU d'une intensité de 2.98 °C. Ce site présente une grande aire asphaltée de couleur noire et un très grand SVF. Le deuxième ICU est enregistré dans le boulevard 1er novembre (PT17) de 2.23 °C. C'est un canyon urbain de faible profondeur, et connu par ses embouteillages et sa circulation automobile très intense. Ce boulevard est orné d'arbres d'alignement (palmiers-dat-tiers) espacés de 9 m en moyenne. Les points de mesure dans la Cité 20 août (PT19) et la rue Zoubiri (PT07) sont plus frais ; avec environ 4 °C de différence par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04). Le boulevard de l'indépendance (5 juillet) (PT18) est moins chaud de 3 °C par rapport au boulevard 1er novembre. Le PT18 présente une plus faible chaleur anthropique et une grande ouverture au ciel. Les sites ouverts et dégagés sont plus chauds, car l'ombre est limitée aux abords des bâtiments. C'est le cas de la place 1er mai (PT11), le site du registre de commerce (PT02) et la cité 400 logements (PT20) par exemple. Le site de la rue Zoubiri (PT07) affiche une différence de 4.39 °C par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04). Les deux points de mesure dans le boulevard Didouche Mourad (PT 08 et 09) confirment aussi le rôle de l'ombre fournie par la géométrie des rues. Le point (PT09) dans le boulevard Didouche Mourad est plus chaud que l'autre point PT08 qui se trouve dans la galerie à arcades (tableau 1).

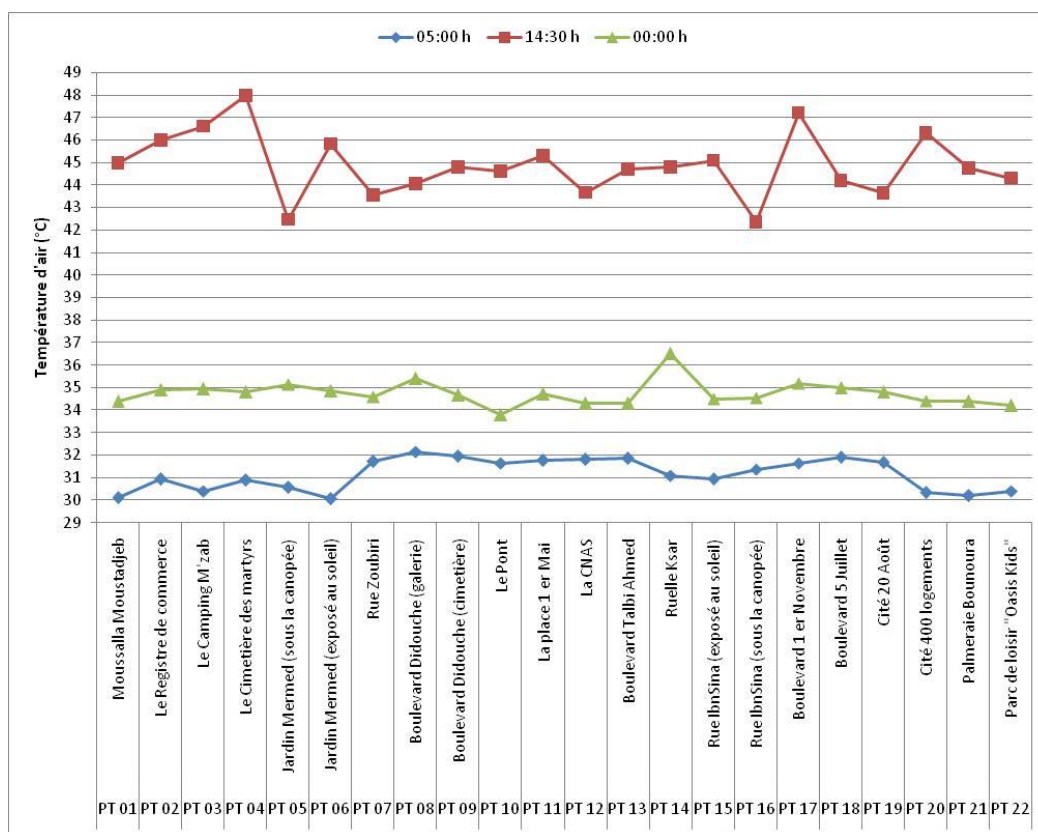


Fig2 : Température de l'air des sites de mesure.

Les sites végétalisés dans l’allée Ibn-Sina PT16, au jardin de Mermed PT05 et le point sous le groupe d’arbres du site PT12 manifestent des îlots de fraîcheur par rapport au site désertique (PT01). Le PCI au niveau de ces sites est de 2.62 °C, 2.50 °C et 1.3 °C respectivement. Le PCI maximal est enregistré dans l’allée Ibn-Sina (PT16) d’une valeur de 5.61 °C. La nuit est marquée par une homogénéité dans les températures des sites avec un écart plus faible par rapport au jour. A minuit l’IFU le plus fort (0.6 °C) est enregistré dans l’oued (PT10). L’ICU le plus intense est enregistré dans la ruelle du ksar (PT14) de 2.1 °C. C’est une ruelle très étroite avec un profil profond (tableau 1). Le point (PT08) dans la galerie couverte du boulevard Didouche Mourad affiche un ICU de 2.05 °C. Ce boulevard est doté de deux galeries à arcades de part et d’autre. Les sites qui ont un grand SVF commencent à se refroidir plus rapidement tels que les sites : PT02, PT04, PT11, PT20 et PT13. Le boulevard 1er novembre (PT17) est sensiblement chaud aussi en ce moment. À minuit, les sites végétalisés affichent des températures encore élevées. Les espaces verts connaissent en ce moment des ICUs de faible intensité. Le PCI maximal à l’aube est obtenu dans le jardin de Mermed (PT06) d’une valeur de 2.08 °C. À la fin de la nuit (05h00), l’intensité de l’ICU est plus importante que celle relevée à minuit. À l’aube, on constate que le site désertique de référence connaît un rythme de refroidissement plus rapide que la ville.

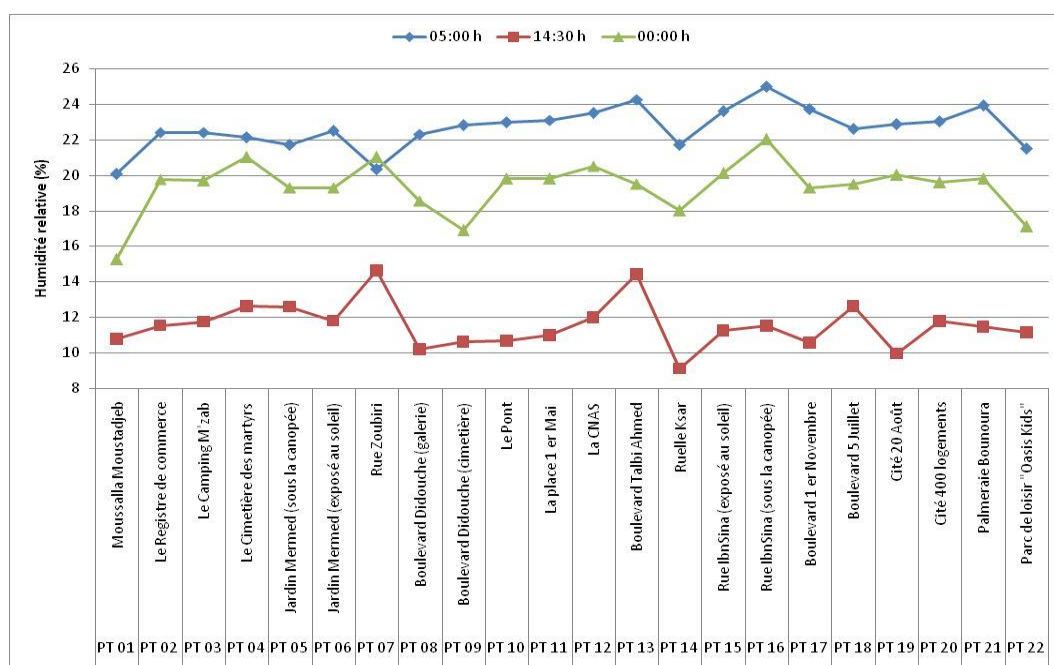


Fig3 : Humidité relative de l’air des sites de mesure.

La figure 11 montre une humidité relative faible pour l’ensemble des sites, y compris les espaces verts. Dans la rue Ibn-Sina, l’humidité relative affiche 11.5 % au PT16 et 11.2 % au PT15. Au jardin de Mermed, elle est de 12.5 % au PT05 et 11.8 % au PT06. Le site de référence affiche quant à lui une humidité relative de 10.75 %. Les sites végétalisés ne manifestent pas de différence significative d’humidité par rapport aux autres sites urbains. À minuit, les sites urbains affichent des taux d’humidité relativement plus élevés par rapport au désert. À l’aube, on remarque que tous les sites voient leur humidité s’élever.

4 Discussion

Les résultats des températures de l'air révèlent une amplitude thermique quotidienne de 15 °C, et des différences intra-urbaines notables en matière de température d'air qui s'élève à 6 °C. Le long du parcours urbain, les sites investigués manifestent soit un îlot de chaleur, soit un îlot de fraîcheur IFU par rapport au désert. Il a été décelé plutôt un « archipel » de chaleur au lieu d'un ICU unique. L'intensité maximale de l'ICU est de 2.98 °C. La différence de température entre les sites urbains est due principalement à l'ombre fournie par la géométrie des rues et leur orientation. Dans la cité "20 août" (PT19) par exemple, l'air est plus frais de 4.31 °C par rapport au site du cimetière des martyrs. Cette cité, conçue par l'architecte André Ravéreau, est réalisée selon les principes bioclimatiques ancestraux. Ses ruelles piétonnières brisées sont de profils profonds et sont dotées de passages couverts (tableau 1). La morphologie urbaine de cette cité souligne l'importance de la géométrie du bâti et le profil des rues dans la protection contre le rayonnement solaire. Le site de la rue Zoubiri (PT07) affiche une différence de 4.39 °C par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04). Ceci est dû au profil géométrique, relativement profond de la rue et à son orientation est-ouest qui offre plus d'ombre au milieu de la journée comparée à une orientation nord-sud où elle serait exposée de plein fouet à l'irradiation solaire. En revanche, la grande ouverture au ciel (SVF) et l'absence d'ombre dans les sites "ouverts" les exposent à la forte insolation et se traduisent par l'élévation importante de la température durant le jour. L'albédo des surfaces, en particulier au niveau des rues asphaltées (de couleur noirâtre) participe aussi au stockage de la chaleur et l'augmentation des températures. De plus, la grande énergie anthropogénique contribue à la surchauffe de l'air dans les sites qui connaissent une circulation automobile intense, et des nombreux climatiseurs accrochés aux façades. Des îlots de fraîcheur ont été observés au niveau des espaces verts. L'IFU maximal atteint une intensité de 2.62 °C, alors que l'effet rafraîchissant maximal de végétation est de 5.61 °C (enregistré entre le site du cimetière des martyrs et l'allée Ibn-Sina). Lin et al. (2023) révèlent que le couvert arborescent a un pouvoir rafraîchissant très important. Sabatino et al. (2020) affirment aussi que la végétation urbaine pourrait atténuer l'intensité de l'ICU de 40 % par rapport aux sites non végétalisés.

Le site désertique de référence (PT01) connaît durant la nuit, un rythme de refroidissement plus rapide que la ville. Le désert perd rapidement sa chaleur grâce à la faible capacité thermique du sol et la grande ouverture vers le ciel ou SVF (Sky View Factor). Le désert dégagé à l'extérieur de la ville a profité toute la nuit du rayonnement de grande longueur d'onde vers le ciel pour se refroidir ; le vent a, de plus, favorisé des échanges convectifs importants. En revanche, les sites urbains tardent à perdre l'énergie stockée à cause de la grande capacité thermique des matériaux de construction, de la géométrie complexe du bâti et de la chaleur anthropique. L'ICU enregistré dans la ruelle du ksar (PT14) est dû au profil très profond de cette ruelle qui empêche la dissipation rapide de la chaleur emmagasinée durant le jour. De plus la chaleur générée par les climatiseurs et les cuisines participe au réchauffement durant la nuit. La grande capacité thermique des matériaux de construction a permis aussi le stockage d'une grande quantité d'énergie. Si les sites compacts et les ruelles étroites et brisées offrent davantage d'ombre durant le jour, les sites ayant une grande ouverture au ciel perdent plus rapidement leur chaleur durant la nuit. Ainsi, les sites avec un grand facteur de vue au ciel connaissent en général un rythme de refroidissement nocturne rapide. C'est le cas des sites PT02, PT04, PT11, PT20 et PT13 (voir profils et images dans le tableau 1). Kalogeropoulos et al. (2022) considèrent aussi que les rues étroites, les propriétés thermiques des matériaux de construction et l'absence de végétation sont les principaux facteurs affectant la variation des comportements thermiques entre les sites urbains.

Au niveau des sites végétalisés, l'ombre de la couronne foliaire des arbres réduit la température d'air durant le jour, néanmoins, elle empêche considérablement le refroidissement nocturne. La chaleur de la journée se trouve piégée entre le feuillage et le branchage des arbres. Cette chaleur contribue au réchauffement de l'air sous la canopée durant la nuit. Des observations similaires sont rapportées par d'autres chercheurs (AboElata, 2017 ; Puliafito et al., 2013 ; Sofer et Potchter, 2006). Les résultats indiquent que l'effet rafraîchissant de la végétation durant le jour est dû principalement à l'ombre fournie par la canopée dense des arbres. L'effet rafraîchissant maximal de la végétation (PCI max) à l'aube est de 2.08 °C. Matallah et al. (2023) ont rapporté des résultats similaires dans la ville chaude et aride de Tolga en Algérie.

Les sites végétalisés ne manifestent pas de différence significative d'humidité par rapport aux autres sites urbains. La végétation a donc peu d'influence sur la variation de l'humidité relative à travers les sites étudiés au milieu du jour. L'évapotranspiration étant très minime, ne contribue pas efficacement au rafraîchissement. Le manque d'irrigation réduit l'effet de l'évapotranspiration et ainsi le pouvoir rafraîchissant de la végétation. Certaines études ont affirmé l'effet du manque d'humidité sur le potentiel de rafraîchissement de la végétation (Wang et al., 2023). Dans une étude antérieure réalisée à Ben-Isguen dans la vallée du M'zab, il a été relevé une humidité relative faible (9 % en moyenne) au sein de la palmeraie durant le jour (Bencheikh et Amieur, 2012). De ce fait, la végétation a peu d'influence sur la variation de l'humidité relative au milieu du jour à cause d'une part au phénomène de "la résistance stomatique", et d'autre part au caractère xérophytique des arbres (Chow et Brazel, 2012 ; Dubost, 2002). Les résultats de la présente étude corroborent ceux de l'étude de Kitous et al. (2012).

5 Conclusion

La recherche avait pour objectif la caractérisation de l'ICU et l'étude des effets de la morphologie urbaine et de la végétation sur les conditions thermiques dans la ville de Ghardaïa. Il a été décelé plusieurs ICUs à travers toute la ville, donc il s'agit d'un "archipel" de chaleur plutôt qu'un ICU unique. L'effet rafraîchissant de la végétation est attribué principalement à l'ombre des arbres. Les résultats montrent que la morphologie urbaine influe fortement sur le comportement thermique des espaces urbains. L'ouverture au ciel (SVF), le profil des rues, l'orientation des rues, l'intensité des activités anthropiques et l'albédo des surfaces sont parmi les facteurs déterminants. Durant la nuit, le profil très profond des rues et la géométrie complexe du bâti (faible SVF) empêchent la dissipation rapide de la chaleur emmagasinée durant le jour. La grande capacité thermique des matériaux de construction conduit au stockage d'une grande quantité d'énergie. Si l'ombre de la couronne foliaire des arbres réduit la température le jour, le feuillage et le branchage de l'arbre piègent la chaleur et empêchent considérablement le refroidissement nocturne vers la voûte céleste. Le manque d'irrigation, la nature xérophytique des arbres et l'effet du vent limitent l'effet rafraîchissant des arbres.

Il est recommandé de concevoir des configurations urbaines offrant de l'ombre tout en étant bien ventilées. Préférer un tissu urbain compact plutôt qu'un tissu lâche. Les trottoirs doivent être aménagés par des arbres d'alignement à canopée large. Les galeries à arcades bien ventilées sont une solution efficace. Il faudrait aussi éviter les vastes aires asphaltées ou pavées de couleur sombre, et les remplacer par des matériaux de couleurs claires afin de diminuer l'accumulation de la chaleur. Il est aussi conseillé de densifier les espaces verts pour en créer une "ville-oasis". Les arbres à planter devraient avoir des couronnes larges pour donner plus d'ombre, et des canopées hautes afin de permettre la ventilation nocturne.

Références

1. -AboElata, A. A. A. : Study the Vegetation as Urban Strategy to Mitigate Urban Heat Island in Mega City Cairo. *Procedia Environmental Sciences*, 37 :386 – 395 (2017).
2. -Bencheikh, H. et Amieur, R. : The Effects of Green Spaces (Palme Trees) on the Microclimate in Arides Zones, Case Study: Ghardaia, Algeria. *Energy Procedia*, 18,10-20. (2012).
3. -Bensalah, I., Yousfi, B., Mena, N. et Bougattoucha, Z. : Urbanisation de la vallée du M'zab et mitage de la palmeraie de Ghardaïa (Algérie) : un patrimoine oasien menacé », *Belgeo* [En ligne], 2 | 2018, mis en ligne le 17/07/2018, consulté le 02/12/2022. URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/24469> (2018).
4. -BenShalom, H., Potchter, O., Tsoar, H. : The effect of the urban heat island and global warming on thermal discomfort in a desert city- the case of Beer Sheva, Israel. *The seventh International Conference on Urban Climate*, 29 June - 3 July 2009, Japan (2009).
5. -Bouchair, A. : Decline of urban ecosystem of Mzab valley. *Building and Environment* 39, pp. 719–732 (2004).
6. -Bowler, D.E.; Buyung-Ali, L.M.; Knight, T.M.; Pullin, A.S.: A systematic review of evidence for the added benefits to health of exposure to natural environments. *BMC Public Health*, 10, 456. (2010).
7. -Chebli, M., Charfi, S., Dahech, S.: Répartition spatio-temporelle des températures dans l'agglomération de Kairouan (Tunisie) pendant la saison chaude 2019. *Climatologie*, 17, 4 (2020).
8. -Chow, W. T. L., and Brazel, A. J. : Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 47 (1), pp. 170–181. (2012).
9. -Dialesandro, J. M., Wheeler, S. M. and Abunnasr, Y. : Urban heat island behaviors in dryland regions. *Environ. Res. Commun.* 1 (2019) 081005. (2019).
10. -Dubost, D. : *Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes*. Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides. Algérie, 423 p. (2002).
11. -Garcia-Cueto, OR., Jauregui-Ostos, E., Toudert, D., Tejada-Martinez, A. : Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., Mexico and its relationship with land use. *Atmosfera* 20, pp. 111–131 (2007).
12. -Givoni, B. et Noguchi, M. : Issues and problems in outdoor comfort research, in: *Proceedings of the PLEA'2000 Conference*, Cambridge, UK, July 2000. (2000).
13. -Kalogeropoulos, G, Dimoudi, A, Toumboulidis, P, Zoras, S. Urban Heat Island and Thermal Comfort Assessment in a Medium-Sized Mediterranean City. *Atmosphere*; 13 (7) : 1102. (2022).
14. -Harlan, S.L., Brazel, A.J., Prasad, L., Stefanov, W.L. and Larsen, L. : Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress, *Social Science & Medicine* 63 (11), pp. 2847–2863 (2006).
15. -Hémon, D., Jouglu, E., Clavel, J., Laurent, F., Bellec, S., Pavillon, G.: *Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 en France*. République Française. Ministère de la santé de la famille et des personnes handicapées. Institut de veille sanitaire. Numéro spécial : BEH n° 45-46. (2003)
16. -Kitous, S. : *Forme urbaine et environnement thermos-aéraulique en climat chaud et sec : Cas du ksar de Ghardaïa dans le Sahara algérien*. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme, Alger, Algérie. (2012).
17. Lin, J., Zhang, H., Chen, M., Wang, Q. Socioeconomic disparities in cooling and warming efficiencies of urban vegetation and impervious surfaces. *Sustainable Cities and Society*, Volume 92, 104464, (2023).
18. -Matallah, M., E., Ahriz, A., Zitouni, D., C., Arrar, H., F., ... Attia, S. A methodological approach to evaluate the passive cooling effect of Oasis palm groves. *Sustainable Cities and Society*, Volume 99, , 104887. (2023).
19. -O.N.M.: Office national de météorologie, station de Ghardaia. (2016)
20. -Potchter, O., Yaakov, Y., Shashua-Bar, L., Cohen, S., Tanny, J., Bar-Kutiel, P. : The use of urban vegetation as a tool for heat stress mitigation in hot and arid regions, case study: Beer Sheva Israel. *City Weather: Meteorology and Urban Design*, 1-13. (2011).
21. -Potchter, O., Ben-Shalom, I., H. : Urban warming and global warming: combined effect on thermal discomfort in the desert city of Beer Sheva, Israel. *J. Arid Environ.* 98, pp. 113–122. (2013).

22. -Puliafita, S., Bochaca, F., Allende, D. and Fernandez, R. : Green Areas and Microscale Thermal Comfort in Arid Environments: A Case Study in Mendoza, Argentina, *Atmospheric and Climate Sciences*, Vol. 3 No. 3, pp. 372-384. (2013).
23. -Saaroni, H., Amorim, J. H., Hiemstra, J. A. et Pearlmutter, D. : Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions. *Urban Clim.* 24, 94–110. (2018).
24. Sabatino, S. D., Barbano, F. , Brattich, E. and Pulvirenti, B. The Multiple-Scale Nature of Urban Heat Island and Its Footprint on Air Quality in Real Urban Environment. *Atmosphere*, 11, 1186; (2020). doi:10.3390/atmos11111186
25. -Sofer, M., and Potchter, O. : The urban heat island of a city in an arid zone: the case of Eilat, Israel. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 85, pp. 81–88. (2006).
26. -Taleb, H. et Taleb, D.: Enhancing the thermal comfort on urban level in a desert area: Case study of Dubai, United Arab Emirates. *Urban forestry & urban greening*, 13(2), 253-260. (2014).
27. Wang, C., Ren Z., Du, Y., Guo, Y., Zhang, P., Wang, G., Hong, S., Ma, Z., Hong, W., Li, T.
28. Urban vegetation cooling capacity was enhanced under rapid urbanization in China. *Journal of Cleaner Production*. Volume 425, 1, 138906, (2023).

New reading of a cultural port landscape located in ghar el melh: towards an ecodeveloppement model of a small morisco tunisian town

Sahar Karray ^{1,2}, Angel Raul Ruiz Pulpón ², Et Hichem Rejeb¹.

¹Higher Agronomic Institute of Chott-Mariem, University of Sousse, UR « HPE » & PG2M, Tunisia.

² Department of Geography and Land Use Planning, University of Castilla-La Mancha, Spain.
saharkarray87@gmail.com

Abstract. The coastal town of Ghar el Melh has gained greater influence and notoriety than other similar Morisco sites in the northern Tunisia due to its urban and social character. Despite the interest attributed by many studies, the city lacks a comprehensive holistic analysis that emphasizes its distinctive qualities. This study aims to explain the establishment of a hydraulic Morisco society on the northern Tunisia coast, and to determinate a small port city valorisation scale, resilient to environmental and transformations. Establishing a grid of objective readings, interpretations and contemporary interventions, multi-scale landscape analysis applied throughout the study, determinates indicators of awareness and improvement of heritage and landscape components. This enables us to present a new reading grid of the city, including the structural, functional, values and heritage attributes. Furthermore, the landscape of Ghar El Melh ensures that architectural, urban and hydraulic socio-cultural practices are resilient to environmental degradation and limited planning. A wide enough variety of options to make this city a good illustration of rural urban practices and sustainable development. We have been able to identify obstacles for new projects in terms of ecological development, attractiveness, and marking the uniqueness of this site by combining the issue of protecting the natural and cultural heritage with managerial dynamics.

Keywords: Historical Landscape, Resilience, urban-rurality, sustainability, potentials.

1 Introduction

Landscape issues have become a major concern of territorial policy and undoubtedly an integral part of planning policy [6]. It is essential to lead a progressive logic allowing to contemplate, to understand and eventually to plan the places [7]. At first glance, the concept of landscape is so complex to define that anyone attempting to analyze it quickly proves that there is no theory that fully explains it. None of the contracts deal with it. Any attempt is doomed to prejudice and imperfection [1]. From the point of view of art and literature, the countryside is a portrait of a face, a representation in words, text or images. It is a spiritual, and emotional interpretation that has been

6. Donadieu, P., et Rejeb, H. : Abrégé de Géo médiation paysagiste. Ed., Imp. Off. Rep Tunisienne. Tunis (2009).

7. Rejeb, H. : L'instrumentalisation des paysages ruraux en faveur du patrimoine. In : Mrabet, A.(eds). Les politiques patrimoniales dans les pays du Maghreb, pp 103-119. Soutumedias, Tunis (2020).

translated into the artistic and literary language and is widely used today [8]. Thus, from a scientific point of view, especially from a geographical and historical point of view, landscapes can be seen, described and interpreted through concepts, represented in two or three dimensions, most often by means of maps and diagrams. In the social sciences and humanities, the landscape as part of the region is perceived by the population, whose characteristics arise from the interplay of natural and cultural factors, and whose tangible and intangible products change with society, age, and time. It is a social and cultural construct that culture. [Mata Olmo, R, 2014] highlights the importance of culture as a social construct, the result of a collective historical experience in all areas of life that generates the set of shared values and attitudes [9]. The whole constitutes historic landscape which is defined as a historical layer of culture, values and natural attributes [10,11]. In addition to that, traditional built environment of historic cities reflects community values on the city's composition and spatial arrangement. The urban character can be traced back to socio-cultural aspects such as values and traditions. Environmental conditions such as climate and geographic factors such as materials, economics and statics influence architectural details [12]. In Tunisia, which contains various civilizations, as elsewhere, the historic centres are still experiencing a deterioration of old neighborhoods caused by rapid socio-economic development. Above them are Morisco towns. Both of urban and rural aspects, these cities changed the composition of the northwestern Tunisia's landscape, particularly Ghar el Melh, which had a great impact thanks to its urban, rural and social character. Conventional efforts to protect historic centers have failed or were unsupported in most of these centers, including Ghar El Melh, due to a number of problems, like the constrained scope of development projects. In addition to that, the site's geomorphological evolution and the seaside tourism activity's development, have notably changed the physiognomy, forms and functions of the urban and agrarian space. Although numerous studies have concentrated on Ghar el Melh's distinctive agricultural soil and how it has been exploited, as well as its history, legacies, and architectural elements [13,14,15,16]; the city lacks a holistic global approach. The purpose of this study is to explain, according to transdisciplinary approaches, the establishment of a hydraulician society on the Tunisian north coast as well as to determine the scales of valorization neo-landscape, applicable to a small port city resilient to environmental and social vulnerabilities. Starting from

-
8. Donadieu, P., et Rejeb, H. : Chroniques Paysagistes des deux rives de la Méditerranée. Ed., Imp. Off. Rep Tunisienne. Tunis (2011).
 9. Mata olmo, R.: El Convenio Europeo del Paisaje del Consejo de Europa, Notas sobre su aplicación en España. Patrimonio cultural y derecho N° 18, 175-206 (2014).
 10. UNESCO.: Fifteenth General Assembly of States Parties to the Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage; UNESCO: Paris, France (2005).
 11. UNESCO. : World Heritage Centre. Developing Historic Cities Key Understanding and Taking Actions ; UNESCO : Paris, France (2014).
 12. Khalaf, R.: Traditional vs modern Arabian morphologies. Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development N°1 V°2,27-43 (2012).
 13. Saadaoui, A., Djelloul, N. : Ghar el Melh : Une ville portuaire tunisienne du XVIIe siècle. Africa N° XV, 185-203(1997).
 14. Hbaieb, M A.: Les documents iconographiques et cartographiques au service de l'archéologie: le cas de Ghar el-Milh. Études en patrimoine écrit, pp 37-52. Ed, centre national de calligraphie, Tunis (2017).
 15. Moussa,M., Baccar,L., Ben Khemis, R. : La lagune de Ghar El Melh : Diagnostic écologique et perspectives d'aménagement hydraulique. Journal of Water Science V°18,13-26(2005).
 16. Oueslati,A., El Aroui, O., Sahtout,N. : Sur la grande vulnérabilité du lido du complexe lagunaire de Ghar El Melh et de ses terres humides (Tunisie septentrionale). Méditerranée N° 125, 65-73(2015).

the hypothesis that historical urban landscapes are domains of multiscale interaction, this research recognizes identity landscapes that propose connections between time, space, actors, culture and sustainability. By using a multidisciplinary approach to track inventory, change, and transformation and understanding it through the identification of multi-scale interpretation grid. It describes the establishment of the Ghar El Melh' Morisco hydraulician society. This work develops into a first part that proposes the research methodology. The second part describes the technics used and the results obtained, based on an overview of the detection tools, and the final part highlights the conclusions and different perspectives of the study.

2 Methods.

The starting point of the methodological approach is a literature review for the genius Loci and Historic landscape dealing with sustainability concepts [5,6, 17,18,19]. We emphasize the importance of natural and cultural assets in territorial recovery and the opportunities for the long-term preservation of historic urban landscapes. For this purpose, we developed at the beginning of the study, in order to specialize cities within their territory, a research method, based on geographic data (topographic maps, soil maps, hydrographic maps, large-scale national maps, atlases. The approach presented here features the development of a multi-scale landscape analysis method based on the concept of genius loci [14], which recognizes landscape, urban and architectural merits based on historical sources and old photographs. Through field research using previous research, we attempt to create a mini atlas of the architectural, urban, and agricultural typology specific to Ghar El Melh, due to an investigation and diachronic analysis of form and function. This method calls for a confrontation between landscape determinants and contemporary territorial definition. According to the site's stakes and recognition and evaluation indicators, we proceed to a holistic approach, then to recertification and a clear composition with the region. We propose to describe all the analytical processes we use to monitor and highlight the dynamics of these landscapes' representative of Ghar El Melh. To achieve this, it is critical to demonstrate the application of the geographic research methodology developed at the inception of the study, which uses geographic data to precise the spatialization of cities. The development of a multi-scale landscape analysis method based on the idea of place engineering characterizes the methodology presented here. To do this, we have adopted a progressive approach based on the construction of observable landscape units in the Ghar El Melh region. Although this is a landscape hierarchy, the vulnerable ones are recognizable. Interpretations of these landscape entities to current mappings, either in catalogs or audit approaches specific to the region, allow us to track all diagnostic analyses, and link them to interpretations. This allows us to propose specific intentions of ecological management. Therefore, the components related to architecture, rural development and water landscape linked to urban planning, are harmoniously integrated with ecological coherence from local to global sustainable development concerns. The model can be proposed. Our case study Ghar El

17. Velpaus,L., Roders,A P.: Historic Urban Landscapes – An Assessment Framework. In: Proceedings of the 33rd Annual Meeting of the International Association for Impact Assessment, Calgary Stampede B.M.O Centre, Calgary, AB, Canada (2013).

18. Silva, T., Rodés, A P.: Cultural Heritage Management, and Heritage (Impact) Assessments. In: Proceedings of the International Conference on Facilities Management, Procurement Systems, and Public-Private Partnership, Cape Town, South Africa (2010).

19. Norberg-Schulz, C. : Genius Loci : Paysage, Ambiance, Architecture. Mardaga (1981).

Melh's delegation is situated in Bizerte. To the east, the delegation is bounded by the Utica delegation to the south, the El Aliya delegation to the west, and the Ras El Jebel delegation in the eastern Mediterranean to the north. The town is 57 km north of Tunis and 44 km east of Bizerte. Ghar El Melh, the capital of the eponymous delegation, has half the population living in rural areas. The delegation only included his one other municipality, Aousja and his four regions. Ghar el Melh, Aousja, Bajou, Zuawin. The city has seven kilometers of coastline stretching between Cap Sidi Ali El Mekki and Kalaat El Andalous.

3 Results and discussion

3.1 Ghar El Melh's landscape potentials

The study identified the existence of several landscape facies based on the multiform activities of peasants, rural-urban multifunctionalities, associated with particular ecological and architectural contexts. Ghar EL Melh is a northern coastal village built on a narrow strip of land between the lake and the mountain. The site consists of the part of the Edmina-Nadhour mountain range that ends directly in the sea by the Cap de Ras Sidi Ali El Mekki or Cap Farina and dominates the lagoon and the city of Ghar El Melh.

The surrounding mountain rises to 325 m. On the west side as on the south side, the lagoon is overflowed by an almost marshy terrain. Finally, on the east side, a fairly wide sandy beach separates it from the sea side of the beach of Sidi Ali El Mekki. Nearby is a vast lagoon complex. The village stands out for its originality in terms of location. At the foot of the southern slope of the djebel Nadhour stands a white mass formed by houses as built in amphitheater along the mountain. The choice of site arouses a strong interest of protection, the village perched between the mountain Nadhour and the lake of Ghar El Melh presents a place of refuge.

The area has a wide variety of soils (high-salt soil with powdery horizons, brown limestone soil, rough mineral soil and litho-morph soil). The site has a multitude of natural attractions: mountain, beach and lagoon. It offers a remarkable diversity of landscape. Its adaptation to the natural site-which was shaped by the mountain Nadhour and the lagoon of Ghar El Melh (Fig. 1).

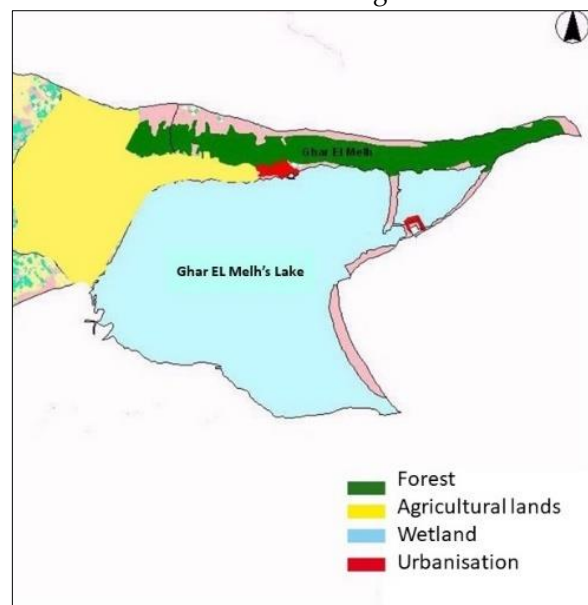


Fig. 2. Landscape units of Ghar El Melh.

The city knows an extension and a distance from the limits of its foundation core from east to west. The Urban fabric is homogeneous, dense, orthogonally structured. The tracing of the main and lateral streets is carried out according to a regular plan with two axes of 8 M Median and South connected by perpendicular axes. The central artery leads to a public urban life square center "La Rhiba", and the southern artery leads to the soul and the port and arsenal. The city of Ghar el Melh presents a succession of Turkish and Andalusian urban cores structured along a major axis that reflects the different waves of immigration that structure in the city. The city of Ghar el Melh is composed essentially of four urban fabrics that correspond to different eras of its history: The first fabric of Turkish history was created during the reign of Ousta Mrad in the 17th century. Its varied architectural style distinguishes it from other Turkish villages. In this fabric, the houses are located next to each other, along the streets and take days for them through the holes of narrow juxtaposed facades. This urban core is marked by a unique architecture that differs from residential architecture and a military port facility. In the 17th century, the Andalusian Morisco were established in Porto Farina at the same time as the first core of the city This fabric is contiguous to the Turkish fabric. The two tissues are divided by an orthogonal street historical axis.

The same principles of integration and spatial organization that apply to Turkish architecture also apply to Andalusian architecture. The joint ownership of the inhabitants is one of the guiding principles of this architecture. As a result, the houses line up away from each other. In the 19th century, an important extension took place on a sloping ground. Porto Farina experienced a development in height with respect to the main axis. These structures reflect a desire to blend into the building culture of the Tunisian medians. Yet colonial architecture is inspired by a collection of sources that together create a unique architectural identity. The windows, which were non-existent or very small in the past, became very elongated in height and fixed by a wrought iron grille.

The urban space since the beginning of the 20th century and after the independence of the country has seen the appearance of a fabric characterized by a morphology that does not respond to any logic of extension or urban development. Today, the village, which is experiencing a proliferation of constructions, is developing in all directions. The city lies between the sea on one side and the mountain on the other, and is 500 meters wide. Because at these two natural boundaries, the value of the land is very high. The extremely low banks of the Ghar El Melh lagoon are almost entirely surrounded by vast marshy regions. Because of the gardening system they use there—a multiplicity of small farms and meticulously planned gardens called Gattayas—it's the northernmost part of the lagoon that gets the most attention. The Gattayas are an important part of the historical, cultural and natural heritage of Ghar El Melh, unique in Tunisia. At the origin of a unique farmland and of great heritage interest, this ancestral technique consists in gaining agricultural land through a form of polderization.

The landscape is unique, with plots (gtayas) scattered in the middle of sebkhas or in the middle of lagoon. The plants are irrigated, from their roots, following the movement, in connection with the tide, of a freshwater lens that forms in the artificial soil.

3.2 Revaluation indicators for Ghar El Melh's Landscape.

In this part of the research, we are interested in discerning whether the transformations of the urban landscape of the city of Ghar El melh, through the production of a new territory and the intensification of ordinary landscapes, work for a quality living environment. For a first location, a visual tracing method was used. Through the study of some views of the urban and architectural landscape, from the surroundings of Ghar el Melh, on the other hand the dominant silhouette of

the city is emphasized. The reading of the city's skyline shows an articulation between the surrounding mountains in the background, and the landscape of forts and arsenal and port. The port was in the seventeenth century the largest privateer port of the Regency of Tunis from which departed formidable galleons belonging to rich shipowners commanded by Arnaut (Albanians) or the Corsican and Levantine renegades who led the race in the Mediterranean against Christian ships and whose income was at the time the main source of wealth of the kingdom of Tunis. In a second place, a strategy of cataloguing and audit of key monuments, construction techniques, was undertaken. The town has a legacy of defensive architecture marked by the presence of the three fortresses in the village (Borj Barrani or Lazaret, El Oustani or Kechla and Borj Loutani). It is also the still present witness of this privateer past, where renegade captives and Turkish, Corsican, Sardinian and Maltese immigrants constituted the bulk of the population. In 1640, the Dey Osta Murad, of a Genovese origin (Sta Mrad Genouiz) redeveloped the port of the village to allow it to receive the military navy of the Bey Husseinite and become in the seventeenth century the largest military part of the country before Bizerte, Sousse and Sfax. Later, the Borj was transformed in the nineteenth century into a military garrison of the Bey, and then into prison for convicts until the date of Tunisia's independence in 1956. The intangible heritage of Ghar el Melh is of great interest in the city. During this part of the research, our goal is to identify where the tangible and intangible heritage of the city can be catalysts for a sustainable management approach to heritage practices in Ghar El Melh. To maintain mastery of this knowledge and expand its influence outside, an effort and investment of energy must be undertaken. In addition, Ghar El Melh has unquestionably emerged as a hotspot for local tourism, projecting an image of a small paradise with an increasing number of facilities to preserve natural resources as shown in Fig2.

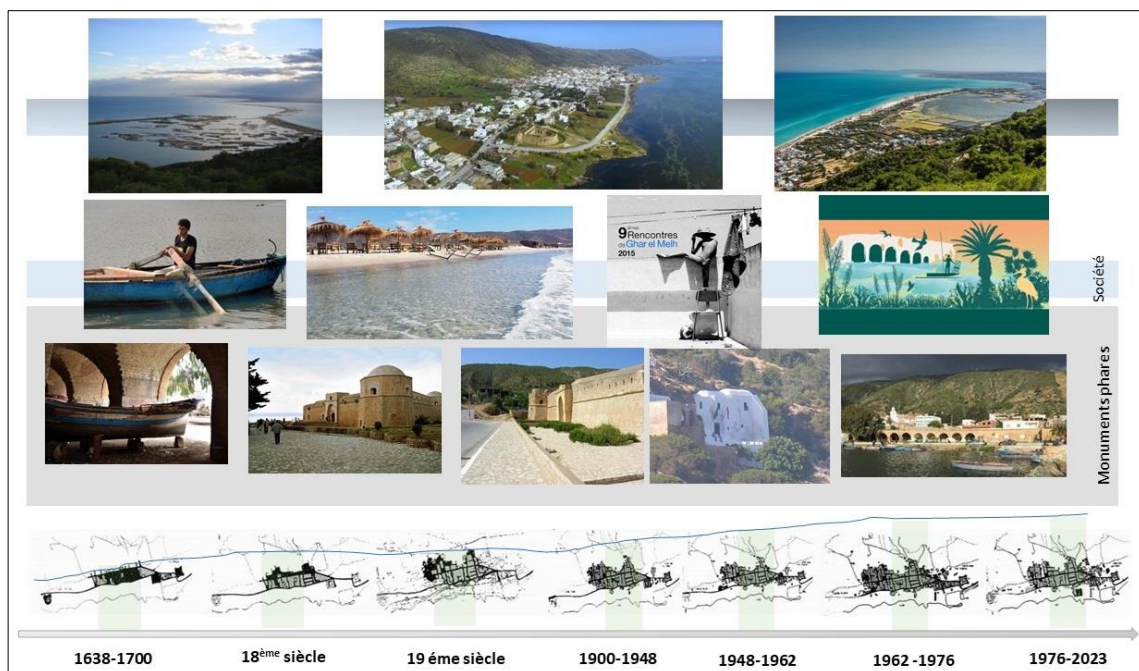


Fig. 2. Revaluation indicators for Ghar El Melh S. Karray (2023).

3.3 Discussion

This work presents a recognition grid that applied to a historic site to understand, read and interpret how these actions have changed urban areas over time. This study adopted a new reading strategy that focuses on the relationship between time, place, actors, culture and sustainability by treating the historic urban landscape as areas of interaction at multiple scales. This is understood by describing, using transdisciplinary approaches, the establishment of a morbid society along the coast, monitoring the state of the environment, examining changes over time, and locating a multi-scale reference.

Highlighting urban growth's socio-spatial dynamics resulting from interactions between people and their environment. Analysis of the results of the study shows that the city of Ghar el Melh, despite its remoteness from the great terrestrial communication routes, occupied a very important location dominating a lake of the same name. [Sadaoui and al, 1997], add that the mountain surrounding the city in Djebel El Nadhour reinforces the defensive character of the city [8]. The same authors add that with the exception of Ghar el Melh, which was built around the port, the towns and villages of this region were initially located behind the sea. Long isolated, this village has seen a resurgence thanks to its fine beaches and seaside services on the Tunisian coast. In addition to the first historic center, his second urban center emerged during his last two decades of the 20th century. Unlike the Tunisian medina of the time, it was preconceived and a typical demonstration of urbanization based on a very regular plan [8]. Ghar el Melh's urban and suburban environment has undergone significant structural and functional changes. However, this development can be explained by the socio-spatial interactions of the population. Our investigations allow us to understand the discontinuous urban extent that stretches from the center to the agricultural perimeter, in particular the extent of the typical gardens "Gettaya "or Ramli. Gardening is the result of a unique panorama of a very orderly small garden, sometimes lost in the middle of a swamp [20]. Farmers have sometimes benefited from new constructions along Ghar El Melh's coast to increase the size of their plots (such as the creation of a new fishing port), but today they are under new pressure on their land by the summer residents who have chosen this area as the new fringe station of Bizertine coast. The construction of the fishing port in the mid-1970s came at the expense of the coastal barrier that would define the Ghar El Melh lagoon. Sediment dynamics along the beach have undergone significant changes as a result of this activity [21]. Between the northeast and southwest sections, there was an obvious division and this because the Gattaya partially occupy the coastal cordon, there are now land issues [22]. With a sea level rise of one meter, the lagoons

20. Oueslati, A. : Littoral et aménagement en Tunisie, des enseignements de l'expérience du vingtième siècle et de l'approche géographique à l'enquête prospective. Orbis Presse, Tunis (2004).

21. Boujarra, A. Ayache, F. : le complexe lagunaire de Ghar el Melh, les métamorphoses d'un géosystème côtier. Faculty of Arts and Humanities's Press, Sousse (2017).

22. Zaier,S., Saidane, I., Hammami-Habibi, S., et Rejeb, H. : Le paysage agraire littoral de Ghar El Melh, un patrimoine à valoriser. In : Paysages et nouvelles ruralités, Unité de recherche Horticulture, paysage et environnement, ISA CM 's press, Sousse (2017)

of Ghar El Melh would give way to a bay [16]. This compromises a space of interest for natural ecosystems and landscape but also for the economy of the region, the lagoon complex offering an undeniable part of the resources exploited by the inhabitants [11,17]. The Ramli lands present one of the most threatened areas. Sebkh-type land, which is now repulsive, could, however, become permanently occupied by marine waters. It can also be seen that a considerable loss of fertile farmland on narrow plains was caused by the increase in second homes. The effects of this occupation are currently being felt on the social, economic, environmental and landscape levels [11,17]. We must also add that secondary summer houses currently occupy a number of Tunisian coasts. However, the extension of urbanization has created serious problems with the quality of the public domain. As a result, urban expansion along the coastline has also resulted in the loss of agricultural land, forcing many farmers who maintain micro-plots to cease operations in anticipation of a profitable sale [10,11,17].

4 Conclusions

The aim of this study is to interpret and explain from a global perspective the social and political process taking place in specific urban environments and their integration into urban spaces. This approach considers a combination of social and economic cultural expressions in addition to knowledge perspectives perceived and known by the local population. The traditional built environment of historic cities reflects community values in urban composition and spatial arrangement. The character of a city can be traced back to socio-cultural aspects such as values and traditions. Environmental conditions such as climate and geographic factors such as materials, economics and statics influence architectural details. The chosen approach is that the Ghar El Melh landscape, rich in identity vestiges, facilitates the construction of new territorial potential, addresses site vulnerabilities, and, through anew spatialization approaches, contributes to resilient regional development approaches applicable to sustainable towns, and establishing a real civic participation.

References

1. Donadiou, P., et Rejeb, H. : *Abrégé de Géo médiation paysagiste*. Ed., Imp. Off. Rep Tunisienne. Tunis (2009).
2. Rejeb, H. : *L'instrumentalisation des paysages ruraux en faveur du patrimoine*. In : Mrabet, A.(eds). *Les politiques patrimoniales dans les pays du Maghreb*, pp 103-119. Soutumédias, Tunis (2020).
3. Donadiou, P., et Rejeb, H. : *Chroniques Paysagistes des deux rives de la Méditerranée*. Ed., Imp. Off. Rep Tunisienne. Tunis (2011).
4. Mata olmo, R.: *El Convenio Europeo del Paisaje del Consejo de Europa, Notas sobre su aplicación en España*. Patrimonio cultural y derecho N° 18, 175-206 (2014).
5. UNESCO. *Fifteenth General Assembly of States Parties to the Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage*; UNESCO: Paris, France (2005).
6. UNESCO. : *World Heritage Centre. Developing Historic Cities Key Understanding and Taking Actions* ; UNESCO : Paris, France (2014).
7. Khalaf, R.: *Traditional vs modern Arabian morphologies*. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development* N°1 V°2,27-43 (2012).
8. Saadaoui, A., Djelloul, N. : *Ghar el Melh : Une ville portuaire tunisienne du XVIIe siècle*. *Africa* N° XV, 185-203(1997).

- 9.Hbaieb, M A.: Les documents iconographiques et cartographiques au service de l'archéologie: le cas de Ghar el-Milh. *Études en patrimoine écrit*, pp 37-52. Ed, centre national de caligraphie, Tunis (2017).
- 10.Moussa,M., Baccar,L., Ben Khemis, R. : La lagune de Ghar El Melh : Diagnostic écologique et perspectives d'aménagement hydraulique. *Journal of Water Science* V°18,13-26(2005).
- 11.Oueslati,A., El Aroui, O., Sahtout,N. : Sur la grande vulnérabilité du lido du complexe lagunaire de Ghar El Melh et de ses terres humides (Tunisie septentrionale). *Méditerranée* N° 125, 65-73(2015).
- 12.Velpaus,L., Roders,A P.: Historic Urban Landscapes— An Assessment Framework. In: *Proceedings of the 33rd Annual Meeting of the International Association for Impact Assessment*, Calgary Stampede B.M.O Centre, Calgary, AB, Canada (2013).
- 13.Silva, T., Rodes, A P.: Cultural Heritage Management, and Heritage (Impact) Assessments. In: *Proceedings of the International Conference on Facilities Management, Procurement Systems, and Public-Private Partnership*, Cape Town, South Africa (2010).
- 14.Norberg-Schulz, C. : *Genius Loci : Paysage, Ambiance, Architecture*. Mardaga (1981).
- 15.Oueslati, A. : Littoral et aménagement en Tunisie, des enseignements de l'expérience du vingtième siècle et de l'approche géographique à l'enquête prospective. *Orbis Presse*, Tunis (2004).
- 16.Boujarra, A. Ayache, F. : le complexe lagunaire de Ghar el Melh, les métamorphoses d'un géosystème côtier. *Faculty of Arts and Humanities's Press, Sousse* (2017).
- 17.Zaier,S., Saidane, I., Hammami-Habibi, S., et Rejeb, H. : Le paysage agraire littoral de Ghar El Melh, un patrimoine à valoriser. In : *Paysages et nouvelles ruralités, Unité de recherche Horticulture, paysage et environnement, ISA CM 's press, Sousse* (2017).

AXE 4 : PATRIMOINE BATI ET DEVELOPPEMENT DURABLE



Architectural heritage and sustainability: the contribute of the « Projet CUBATI » Pr. Maria Luisa Germana – UNIPA

« Comment peut-on réellement tirer des leçons des constructions traditionnelles ? »

Pr. Germana a rappelé l'importance du patrimoine et a insisté sur le fait que nous devons tirer des leçons de l'architecture vernaculaire pour une architecture durable contemporaine sans pour autant refaire l'ancien. En effet, il ne s'agit pas d'imiter l'apparence de l'architecture traditionnelle ou de poursuivre des visions idylliques du « bon vieux temps » pour rester figer dans le passé mais de puiser l'inspiration de cette architecture ancienne de manière créative en s'appuyant sur l'innovation et sur la réalité opérationnelle contemporaine et spécifique du contexte.

Elle souligne aussi le fait qu'une architecture durable d'avant ne l'est forcément pas aujourd'hui. C'est dans ce sens que Pr. Germana met l'accent sur la nécessité d'une approche multiscalaire et transdisciplinaire dans une vision systémique. La notion de processus est importante pour produire une architecture durable. Il faudrait s'orienter vers la qualité plutôt que la quantité.

En présentant le projet « CUBATI », elle rappelle l'importance d'une vision holistique qui met l'utilisateur au cœur de la démarche.

L'héritage urbain moderne du XXe siècle au prisme de la durabilité :

Cas des quartiers d'El Menzah 1 et de la cite Mahragène

Salma GHARBI ¹

¹ Université de Carthage, ENAU/ISTEUB, Larpa, Equipe de Recherche sur les Ambiances ERA- Docomomo
Tunisie
salma.gharbi@ucar.enu.tn

Abstract. This research is a continuity of our post-doctoral research on the referential part of modern urban and architectural production in Tunisia and its future. The El Menzah 1 and Cité Mahragène neighborhoods in Tunis are representative of post-war modernity, developed after the country's independence by the Société Nationale Immobilière de Tunis. These neighborhoods offer many qualities of urban and architectural habitability, but from a sustainability perspective, they need to be rehabilitated to meet the social, economic, environmental and governance challenges they face. What lessons can be learned and how can these urban areas be adapted to meet the challenges of sustainable development and the issues at stake, in a process of urban and architectural rehabilitation aimed at both safeguarding these modern heritages and revitalizing them? To answer these questions, we will base our analysis on the typomorphology of the two neighborhoods, as well as on a study of their social and environmental dimensions. The idea is to demonstrate that these heritages of the past deserve, in a sustainable development approach, to be rehabilitated to ensure their longevity.

Keywords: urban heritage, modernity, referential dimensions, sustainability, rehabilitation, governance, patrimonialization

1 Introduction : Mise en contexte et problématisation

La question environnementale est, de nos jours, la problématique planétaire par excellence. Conscients que la terre va de plus en plus mal, que les ressources naturelles se fragilisent et que les gaz à effet de serre ne cessent d'accroître, les Etats se sont mobilisés, depuis déjà quelques années, pour tirer la sonnette d'alarme contre les impacts des sociétés humaines et leurs activités économiques et industrielles. Ainsi, est née une conscience instaurant une écologie politique étant le développement durable. Cette dernière vise à ralentir et arrêter les dommages causés à la planète, aux écosystèmes et à la biodiversité et à permettre, à nos sociétés, de vivre de manière durable, soutenable et équitable.

La notion de durabilité, datant d'une trentaine d'années, remonte à une pensée à la fois environnementale et sociale beaucoup plus ancienne. Spécifiquement la notion « d'écologie urbaine » remonte à la pensée de l'Ecole de Chicago, là où la ville de Chicago, objet d'une urbanisation à l'échelle de la ville, a constitué un vrai laboratoire social. Plusieurs scientifiques comme Robert Park, Ernest Burgess, Roderick McKenzie et Louis Wirth se sont intéressés à la ville « *comme modèle spatial et comme ordre moral* » (Grafmeyer & Joseph, 1984). La ville serait donc le miroir de sa société et de ses cultures. Ce modèle conceptuel, réduit la ville à un seul enjeu de la durabilité étant le sociétal. L'écologie urbaine représente, de nos jours, un concept phare mettant, sous les projecteurs, la relation homme-ville-nature. Cette notion est, en réalité, une idéologie dont les prémisses remontent à la fin du 18ème siècle avec la pensée des hygiénistes et plus tard avec celle des modernistes.

La Charte d'Athènes reste un des aboutissements de la pensée moderniste en relation avec l'espace urbain. Elle représente l'aboutissement du 4^{ème} Congrès International d'Architecture Moderne (CIAM), tenu sur un bateau de croisière, entre Marseille et Athènes sous le thème de « ville fonctionnelle ». Cet ouvrage écrit, dans sa version définitive par Le Corbusier, « *ouvre toutes portes à l'urbanisme des temps modernes. Elle est une réponse au chaos présent des villes. Entre les mains de l'autorité, détaillée, commentée, éclairée d'une suffisante explication, elle est l'outil par lequel le destin des villes sera redressé* » (Corbusier, 1943, p. 48). Cette théorie normative, découle du socialisme utopique de Fourier, d'Owen et de Proudhon, elle n'a été vraiment concrétisée qu'après la guerre, en France autour de Le Corbusier, en Allemagne, autour de l'école du Bauhaus et aux Etats-Unis par l'école de Chicago. D'autres expérimentations urbaines passées pourraient nous informer aussi sur l'évolution de cette prise en compte de ce souci environnemental. Dans ce sens, un regard posé sur des productions architecturales et urbaines antérieures, pourraient nous informer sur des manières, de concevoir l'espace, soucieuses à la fois de l'environnement et de son usager.

Il est question dans cet article d'approcher, à l'aide de la méthode de l'analyse typo morphologique et de l'enquête auprès des habitants, deux tissus urbains et architecturaux de la Tunisie moderne, ceux des quartiers d'habitations d'EL Menzah 1 et de la cité Mahragène bâtis entre les années 40 et début des années 70. Dans ces quartiers modernes, des références spatiales, bioclimatiques et ambiantales sont à souligner. Ces héritages urbains modernes, qui appellent à être reconnus entant que tels, recèlent de plusieurs dimensions qui pourraient être transposées dans nos quartiers actuels et futurs. Loin de nous d'exposer ce patrimoine moderne au paradigme de la durabilité, totalement étranger aux préoccupations de l'époque, nous questionnons, dans cette recherche, la part référentielle de ces quartiers mais aussi nous posons des questions vives autour de l'adaptation de ces formes d'habitats aux conditions présentes et futures d'habitabilité, de leur refonte et leur réaménagement éventuels pour une meilleure réponse aux enjeux actuels de la durabilité mais aussi de leur gouvernance, de leur conservation et de leur patrimonialisation.

2 Les quartiers d'El Menzah 1 et de la Cité Mahragène : genèse et morphogénèse

Ces deux quartiers (voir fig.1) sont le témoignage de la transposition du modèle de la ville fonctionnaliste moderne canonisée par les Congrès Internationaux d'Architecture Moderne (CIAM) et par les doctrines de la charte d'Athènes sous leurs premières tranches respectives ; Crémieuxville (1945-1953) et Cité Saint-Exupéry (1950-1955). Ces premières tranches édifiées, pendant la période d'après-guerre, par les Services d'Architectures et d'Urbanisme (SAU) dirigés par l'architecte, lauréat du grand prix de Rome, Bernard Zehrfuss et plus tard par le Commissariat à la Reconstruction et au Logement (CRL), suivi du ministère de l'urbanisme et de l'habitat, ont été développées, dans les années 60, en plusieurs tranches par la Société Immobilière de Tunis (SNIT). L'idée était de répondre à la problématique de la reconstruction et du recasement de l'après-guerre mais aussi d'offrir un habitat moderne où le confort moderne était assuré : « *L'habitation quitte les marais pour s'élever vers des zones plus saines, les affaires restent centrées sur le port et des liaisons circulaires et radiales sont établies entre elles, en s'efforçant de franchir ou de contourner les obstacles qui se présentent par les trois directions ouest, est et sud* » (AA, n 20, 1948, P 19).



Fig. 3. Les noyaux primaires : Crémieuxville (El Menzah 1) et Saint-Exupéry (Cité Mahragène), source : collection privé/AA, n°55, 1960

Au départ, ces deux quartiers étaient conçus à la fois comme des lotissements-pilotes de recasement pour une population européenne de fonctionnaires d'Etat d'une part, et comme des extensions de la ville de Tunis d'autre part. En effet, le plan directeur d'aménagement développé par Zehrfuss et celui des répartitions des extensions conçu par Bellanger et Deloge (voir fig.2), projetant les nouvelles zones en dehors du noyau historique et ses principaux axes, proposaient un développement naturel de la ville de Tunis selon deux axes : une première aile nord qui s'étendait vers les collines boisées du Belvédère et du Vallon de l'Oued Roriche à partir des années 40, sous forme de cités résidentielles (Belvédère supérieur, cités-jardins). Sur cet axe, plusieurs opérations se sont développées en cités-jardins, en général à caractère résidentiel. Une deuxième aile sud, plus proche d'une concentration d'établissements industriels voisins du port, a marqué la ville des cités fragmentées à dominance de cités ouvrières (mathildeville, bellevue...) (Gordeeff, 1955).

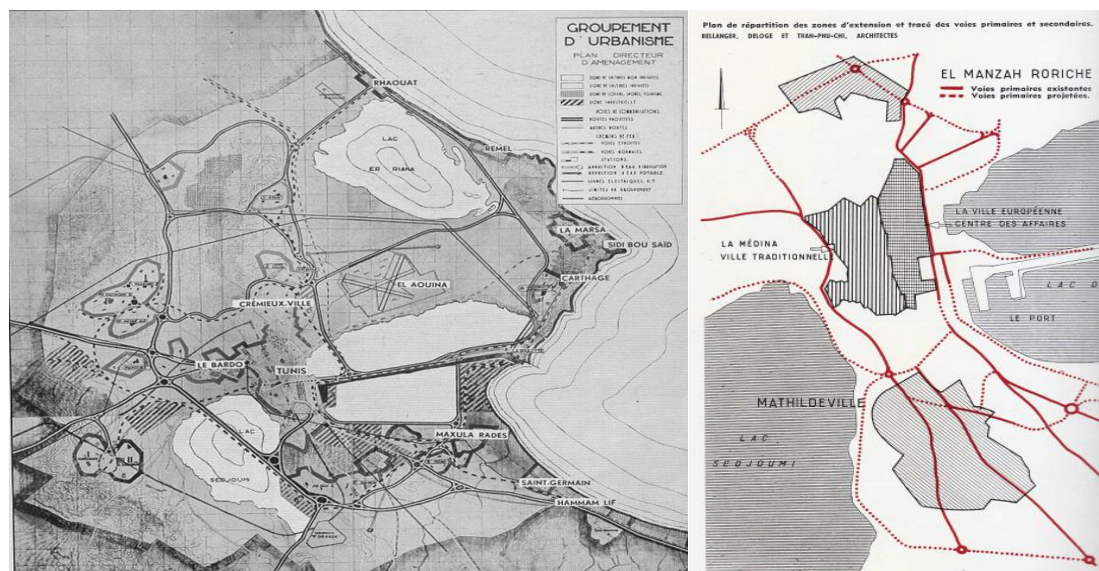


Fig. 4. Plan Directeur d'Aménagement développé par les services d'Architecture et d'Urbanisme, source : Revue l'Architecture d'Aujourd'hui, n°20, 1948 et plan de répartition des zones d'extension de Bellanger et Deloge, source : Revue l'Architecture d'Aujourd'hui, n°60, 1955

2.1 Les différentes tranches du quartier d'El Menzah 1-2-3-4

La première tranche du quartier d'El Menzah a été construite entre 1945 et 1953. À l'origine, cette zone, aérée et dégagée, un peu éloignée du centre-ville de Tunis, nommée Crémieuxville regroupait une trentaine d'habitations individuelles, toutes propriétés de familles juives françaises ou tunisiennes. Ce projet ambitieux visait à créer un modèle de développement urbain moderne et fonctionnel, en réponse aux besoins de la population européenne en Tunisie après la guerre. Il s'agissait d'un recasement administratif qui allait permettre, « l'organisation d'une collectivité nouvelle d'environ 150.000 habitants, dans leur grande majorité des commerçants, de membres de profession libérale, de fonctionnaires » (Gordeeff, 1955, p. 89). EL Menzah Roriche, a été étudié par le Commissariat à la Reconstruction et au Logement (CRL) et développé en particulier par l'urbaniste W. Gordeeff. Le contrat du recasement de Crémieuxville fut attribué à l'architecte Jason Kyriacopoulos. L'organisation de ce quartier comprenait ; des immeubles en barre, des habitations individuelles, des services et des espaces collectifs, une école, crèche, jardins d'enfants, coopératives de consommation, restaurants, cercles pour jeunes. Dans les années 1952, la deuxième tranche d'El Menzah, appelée El Menzah Etat II, a été lancée. Cette phase de développement, initialement basée sur des immeubles collectifs, a finalement inclus un seul immeuble nommé Jarid et un certain nombre d'habitats isolés, ajoutant ainsi une diversité architecturale au quartier. Après l'indépendance de la Tunisie, la Société Nationale Immobilière de Tunisie (SNIT), relevant du Ministère de l'Urbanisme et de l'Habitat, a pris en charge le développement du quartier d'El Menzah à partir des années 60. Plusieurs lotissements ont été créés, tels que celui d'El Moez, d'El Moez Supérieur, de Zarouan et d'Ismailia. Ces nouveaux lotissements (voir fig.3) ont permis de développer le quartier et d'offrir une plus grande variété de logements à la population. Plusieurs modèles prototypes ont été développés en série comme le modèle d'immeuble type El Mehdi ou Atlas pour l'habitat collectif ou les villas Frida, Hayette, Tinour et Lima correspondants aux modèles de villas-duplex répartis dans ces différents lotissements.

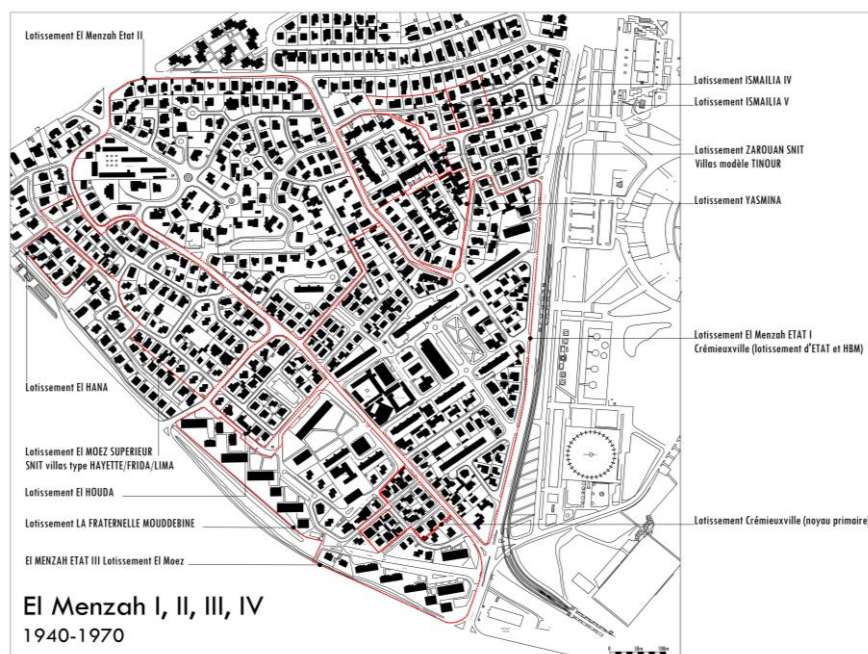


Fig. 5. Morphogénèse du quartier d'El Menzah (1940-1970), source : auteure

2.2 De la cité Saint Exupéry à la cité Mahragène

La cité Saint-Exupéry, première tranche de la Cité Mahragène, constitue le premier noyau édifié au début des années 50 par le Commissariat à la Reconstruction et au Logement (CRL). Ce quartier était une commande de l'Office Tunisien du Logement de l'Aviation (O.T.L.A), devenu, au début des années 60, la propriété de l'Office du Logement Militaire (O.L.M). Son emplacement a été pensé dans la même logique de zone aérée et éloignée du centre et de la zone industrielle. On y trouve des emplacements pour immeubles collectifs, semi-collectifs et des habitations individuelles mais aussi des espaces commerciaux centraux, des aires de jeux pour les enfants et des espaces verts. Au début des années 60, un lotissement de villas prototypiques de type Lima²³, nommé La Fraternelle a été projeté par la SNIT en extension au quartier d'El Menzah. Vers la fin des années 60, une opération de logements collectifs a suivi. Cette nouvelle extension, reprend les idéaux de l'urbanisme moderne à savoir l'abondance des espaces verts, l'aménagement d'allées piétonnes favorisant la déambulation et l'ouverture des logements sur l'extérieur (voir fig.4). L'opération de la SNIT, comprend une première tranche édifiée en 1968, comprenant 9 immeubles²⁴ de deux à trois étages « construits dans des proportions plus proches de l'échelle humaine et orientés est-ouest »²⁵ (SNIT, 1982). en 1970, l'immeuble Intilak, a été construit en R+5 en forme d'étoile avec 40 appartements, suivi de l'immeuble K en 1971, construit en forme de barre et orienté nord-sud, disposant aussi de 40 appartements (voir fig.5).

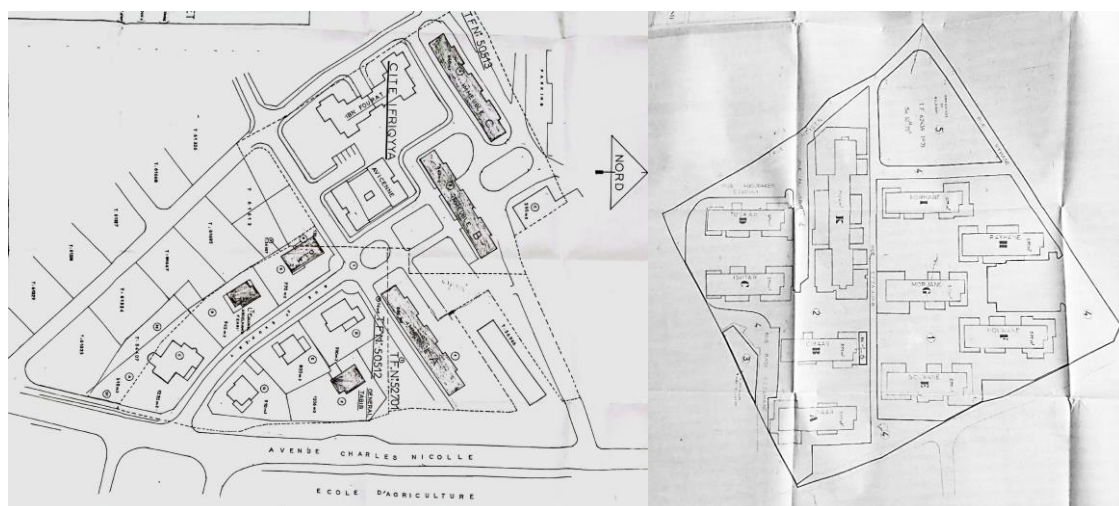


Fig. 6. Premier noyau de la cité Saint-Exupéry et extension de la SNIT en 1968, source : archives de la Direction Régionale de l'Équipement

²³ Le prototype Lima fut développé par l'architecte bulgare Draganov.

²⁴ Il s'agit des immeubles Holwane, Solwane Diar, Chiaar, Morjane, Isthara, Rayhane, Borhane et Tuskar.

²⁵ Données à partir de la note de présentation et programme de l'opération « 160 appartements à la cité Mahragène, El Menzah » disponible aux archives de la Direction Régionale de l'Équipement.

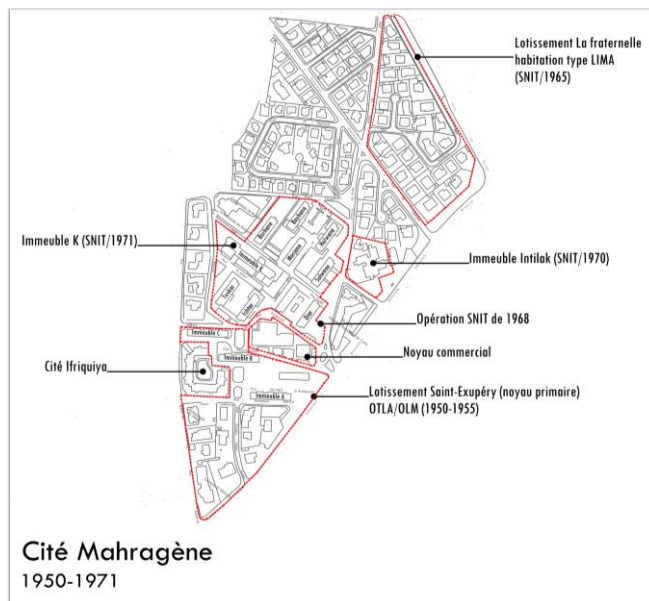


Fig. 7. Morphogenèse de la cité Mahragène (1950-1971), source : auteur

3 La part référentielle des quartiers d’El Menzah 1 et de la Cité Mahragène

Dans cette partie, nous abordons l’étude de la dimension spatiale, environnementale et sociale des quartiers d’El Menzah 1 et de la cité Mahragène (voir fig.6). En nous basant sur une étude typomorphologique et sensorielle des deux sites, nous cherchons à démontrer que ces deux quartiers pourraient, en tant qu’éléments urbains et architecturaux, offrir des références indéniables dans le contexte du développement architectural et urbain durable.

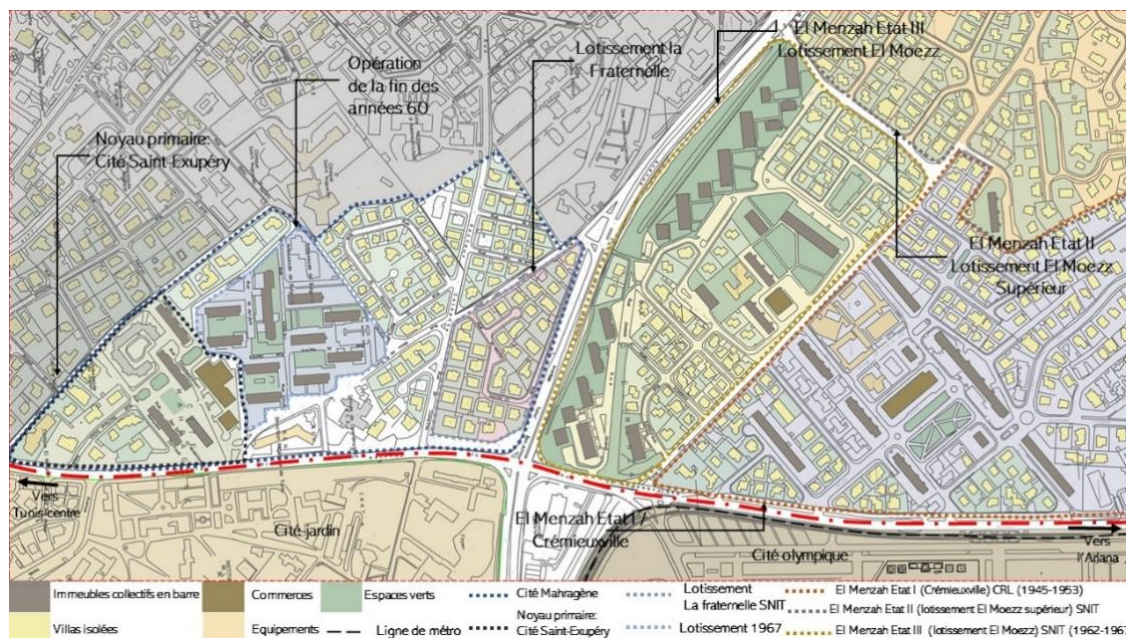


Fig. 8: Corpus d’étude : les quartiers d’El Menzah 1 et de Cité Mahragène, source : auteur

3.1 Le cadre environnemental : composantes, morphologie urbaine, porosité et dominance végétale

Si les noyaux initiaux des deux quartiers conçus par l'équipe de Bernard Zehrfuss témoignent de l'urbanisme moderne des années 40-50, leurs extensions des années 60-70, réalisées par la Société Nationale Immobilière de Tunis (SNIT), s'inscrivent dans la continuité des phases précédentes, suivant le modèle de la cité-jardin. Cet urbanisme se veut ouvert, aéré et dégagé s'organisant comme une mini-ville où les commodités du quotidien sont à la disposition des habitants, offrant un cadre de vie agréable. L'espace est une composition équilibrée entre les espaces construits et les espaces vides. Les pleins comprennent principalement des logements sous leurs trois formes ; collectives, individuelles et semi-collectives ainsi que des équipements (école, collège, lycée, mosquée, commerces de proximité et services). Les espaces vides interagissent avec les espaces construits en définissant des espaces publics partagés, tels que les jardins aménagés, des places, des cours, des allées piétonnes et des espaces verts. Les idéaux fonctionnalistes de l'équipe de Zehrfuss visaient à créer des quartiers proches du quartier d'affaires (centre-ville de Tunis), où étaient regroupées les principales fonctions, à savoir : habiter, circuler, se divertir avec une mobilité qui combinait la marche, la voiture et plus tard les transports en commun, notamment grâce à la ligne de métro desservant le centre-ville à l'Ariana. Ces mêmes idéaux ont été développés ultérieurement au sein des extensions des noyaux originaux (voir fig.7), par les architectes bulgares recrutés par la SNIT ainsi que par d'autres architectes travaillant dans le secteur privé²⁶, qui ont promu l'idée de la cité-jardin. « *La conception urbanistique de la cité Mahragène est traitée dans l'esprit d'une cité jardin. L'implantation des immeubles, observant un prospect assez large, permet d'offrir à l'ensemble des logements, un ensoleillement adéquat et une marge d'isolement suffisante pour assurer un minimum d'intimité pour les occupants. Les espaces libres délaissés entre les contenants bâtis, sont exploités en espaces verts gazonnés de récréation, des allées piétonnières reliant les différents espaces verts et permettent le déplacement d'un immeuble à l'autre sont traitées dans l'esprit d'une promenade agréable mettant les enfants à l'abri des risques des circulations véhiculaires qui sont reléguées à la périphérie* ». (SNIT, note de présentation, 1980).

En plus de cette trame urbaine spécifique et de la densité moyenne de ces quartiers modernes une autre qualité de référence les distingue, à savoir leur dimension poreuse et perméable (voir fig.9). En effet la question de la limite urbaine est très insaisissable dans ces quartiers, l'utilisateur peut traverser les différents îlots directement en raison de l'absence de barrières physiques entre les espaces. Dans le cadre du développement de la cité Mahragène par la SNIT dans les années 60-70, l'accessibilité piétonne a été mise en avant dans l'aménagement de la cité. Cette perméabilité renforce la marchabilité, les points de vue ouverts et la clarté générale de la conception. Les résidents sont encouragés à se promener loin des voitures, à travers des séquences aménagées où l'on trouve une variété de zones, y compris des passages couverts, des espaces minéraux et végétalisés, des allées verdoyantes, etc. Ces éléments "urbatecturaux" favorisent une certaine perméabilité entre les espaces collectifs, semi-collectifs et individuels, ainsi qu'entre les espaces publics et privés.

²⁶ La SNIT a collaboré avec plusieurs architectes modernistes entre les années 60 et 70 comme Jason Kyriacopoulos, Simon Taieb et Cyrille Levandovsky pour l'opération de la cité El Moez à El Menzah, avec Yves Roa et Eddy Grinberg pour l'opération de 1968 à Cité Mahragène et avec Olivier Clément Cacoub pour la résidence « les pyramides » de 169 logements à El Menzah 5 dans les années 70.

Dans ces quartiers, l'objectif n'est pas d'isoler les résidents dans des logements cloisonnés, mais il est essentiel, pour les architectes, de créer des échelles imbriquées entre les logements et les espaces communs, favorisant ainsi la sociabilité entre les voisins grâce à l'utilisation collective des espaces extérieurs.

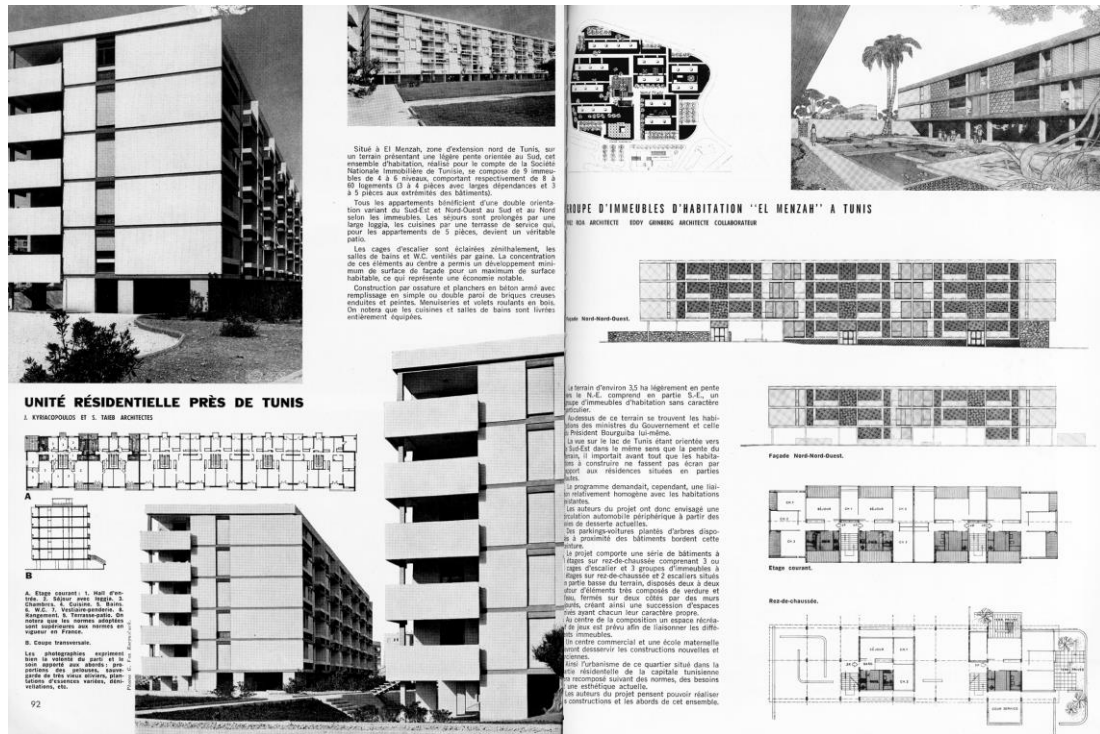


Fig. 9: Opération Cité El Moez par Jason Kyriacopoulos et Simon Taeib et première variante de l'opération Cité Mahrégène par Yves Roa et Eddy Grinberg, source : revue l'Architecture d'Aujourd'hui n°120, 1965

La cité n'est pas cloisonnée comme les nouvelles opérations immobilières qui sont clôturées, sécurisées et coupées de leur environnement physique immédiat. Elle est accessible à tous et appelle à être pratiquée. La végétation est une composante essentielle de ces espaces urbains et contribue au caractère « îlot de fraîcheur » de cette zone au cœur de la capitale (voir fig.8). « *Ce lieu attendant au complexe sportif d'El Menzah qui est fortement végétalisé présente des écarts thermiques de l'ordre de 2 à 4° par rapport aux tissus denses comme celui de la médina de Tunis* » (Gharbi, 2017). L'ombrage fourni par la végétation peut influencer la qualité de vie, ainsi que la création d'une ambiance urbaine et le confort thermique et visuel des usagers. La végétation, au fil des saisons, peut apporter des variations dans la perception de l'espace, créant ainsi une ambiance urbaine changeante et distinctive. Cette variabilité est due aux différentes couleurs des arbres plantés, notamment en saison printanière, qui offrent des nuances telles que le pamplemousse, le violet, le blanc et le jaune.



Fig. 10: Morphologie urbaine, porosité et aspect verdoyant des deux quartiers (Vers la fin des années 60)

3.2 La dimension sociale : vécu, habitabilité et pratiques habitantes

Plusieurs pratiques des habitants sont intéressantes à étudier dans ces deux quartiers. En effet, l'observation menée sur les itinéraires des résidents dans les espaces publics des deux quartiers a révélé une accessibilité aux services et aux commerces. Ces espaces conçus de manière centralisée, dans ce territoire urbain, encouragent les rencontres et la sociabilisation entre voisins. Les habitants trouvent une certaine facilité pour faire leurs courses et accéder aux services disponibles dans leur quartier. Ces lieux semblent autonomes et autosuffisants, offrant un cadre de vie qui facilite la vie quotidienne de leurs habitants. Cet aspect est également renforcé par la proximité des équipements scolaires, de l'école maternelle au lycée secondaire.

D'autres dimensions d'ordre sensoriel et symbolique contribuent à l'appropriation de ces lieux par leurs habitants. En effet, certaines ambiances urbaines caractérisent ces lieux, liées à des dispositifs spatiaux intrinsèques à ces quartiers modernes. Que ce soit en relation avec la morphologie urbaine et son impact sur le microclimat, l'abondance de la végétation, l'aménagement d'espaces de détente et de déambulation, l'ambiance des deux quartiers valorise l'expérience des espaces urbains (Gharbi, 2016). Cependant, le caractère mal entretenu et délabré de certains espaces publics dérange les habitants, qui appellent à un peu plus d'attention de la part des autorités compétentes. La vie dans ces quartiers revêt un sens symbolique en rapport avec leur histoire, leur identité, et leur mémoire collective. Les deux quartiers se présentent comme des lieux d'identification et de repères pour leurs habitants et sont riches de leur passé et leur histoire depuis leur édification et de l'arrivée des premiers résidents européens, qui se sont mêlés à la population autochtone tunisienne.

Au fil des années, les habitants se sont appropriés les espaces privés des logements (voir fig. 9). La pratique la plus courante, au niveau de l'habitat collectif, est la suppression de la loggia²⁷. Cette action dérègle le microclimat intérieur. Les habitants qui l'ont réalisée ont exprimé leurs regrets aux répercussions sur leur confort et leur bien-être à l'intérieur de leurs logements (Jalleli, 2022). Ces pratiques qui touchent l'ensemble des barres modernistes de ces deux quartiers ont un impact très négatif sur leur esthétique et la relation avec les usagers des espaces publics. En effet, de nombreuses personnes s'interrogent sur l'état vieillot et délabré de ces ensembles immobiliers. Cela va au-delà des modifications apportées par les habitants, concernant la peinture, l'ajout d'installations

²⁷ Dispositif emblématique de la modernité architecturale, théorisé par Le Corbusier comme dispositif de protection solaire d'une part et extension du logis et substitut du jardin d'une autre part, la loggia brise-soleil se présente comme un espace poreux et interstitiel entre l'extérieur et l'intérieur qui appelle à être vécu individuellement ou entre les membres de la famille.

paraboliques et d'unités de climatisation extérieures mais, ainsi que l'état vétuste des cages d'escalier, et, dans certains cas la structure de certains immeubles.



Fig. 11: Appropriations des logements par les habitants et transformations des façades des immeubles collectifs à El Menzah 1 et à la Cité Mahragène, source : auteure

3.3 Mobilité, équipements et centralité des commerces

Les premiers noyaux des deux quartiers ont subi, au cours du temps, de nombreuses transformations et une expansion remarquable. Le cadre urbain s'est densifié avec la création, dans l'année 1967, de la cité sportive d'EL Menzah pour les jeux méditerranéens. L'habitat individuel s'est également développé dans l'axe de la ville de l'Ariana à la manière des cités-jardins (El Menzah 4), créant un cadre de vie équilibré entre les espaces bâtis et les espaces verts. La mise en service de la ligne 2 du métro léger en 1989, reliant la place de la République au centre-ville de Tunis à l'Ariana, a fait du quartier d'El Menzah un lieu de jonction, de passage et de rencontre pour de nombreux riverains, grâce à la station "Cité Sportive". Les quartiers d'El Menzah 1 et de la Cité Mahragène bénéficient d'une excellente desserte, regroupant de nombreux équipements éducatifs, ce qui est attrayant pour les familles. Ils offrent de nombreux avantages liés à la qualité de l'espace, à l'abondance de services et de commerces de proximité, ainsi qu'à la connectivité de ces quartiers avec leurs voisins. La centralité des commerces est une caractéristique distinctive aux deux quartiers. Que ce soit l'immeuble CITMA des années 50, le drugstore des années 60-70 à El Menzah 1 qui est actuellement un hypermarché, ou le centre commercial au cœur de la cité Mahragène, ces espaces représentent le cœur battant de ces quartiers. Au-delà de leur fonction commerciale, ils sont de véritables lieux de rencontre et de partage pour les habitants.

4 Les quartiers d'El Menzah 1 et de la cité Mahragène au prisme de la durabilité

Ces fragments urbains modernes se révèlent exemplaires en termes d'habitabilité et cadre environnemental, et la question de leur patrimonialisation devrait être envisagée. Cette expérience pourrait également être requalifiée comme un modèle fructueux pour le développement des futurs ensembles résidentiels. Néanmoins, certains points et limites doivent être soulignés en vue de cette reconnaissance patrimoniale, ainsi que d'une mise à niveau conformément aux enjeux actuels de la durabilité. La question de la réhabilitation urbaine de ces quartiers construits à la fin de la période du protectorat et au cours des premières années de l'indépendance du pays, demeure pri-

mordiale pour assurer la pérennité de ces ensembles résidentiels, témoins du Mouvement Moderne. Dans ce qui suit, nous allons examiner ces ensembles urbains à la lumière des enjeux de la durabilité, à savoir les aspects environnementaux, le sociaux et économiques, tout en tenant compte de leur gouvernance afin de garantir une gestion durable. Notre attention se portera sur les dimensions liées à leurs spécificités urbaines et architecturales modernes, notamment en ce qui concerne l'avenir des immeubles collectifs, la requalification des espaces délaissés, la préservation de la qualité de vie des habitants, l'offre de services, leurs liens d'appartenance, les processus participatifs et leur gestion quotidienne.

4.1 La dimension environnementale des quartiers modernes : entre qualité habitable, mutations et besoin imminent de gouvernance

Plusieurs transformations sont remarquables dans les deux quartiers, notamment les nouvelles formes d'occupation des trottoirs, telles que les extensions des cafés qui altèrent parfois l'identité des quartiers. Une autre grande problématique à souligner est le changement de vocation des anciens bâtiments, devenus des sièges de sociétés, des banques, des écoles privées, des commerces et des cafés ce qui pose de réels problèmes aux habitants. Cette transformation entraîne parfois une congestion qui crée un malaise parmi les riverains, les obligeant parfois à recourir à des procédures juridiques pour dénoncer des pratiques et autorisations non conformes à la réglementation. Les aspects les plus désagréables concernant le changement de vocation des logements collectifs, la détérioration et les modifications des façades des immeubles, ainsi que le manque d'entretien des espaces publics. Ces problèmes regrettables dans les deux quartiers soulèvent de véritables questions liées à la gestion de ces biens immobiliers, à l'entretien des espaces publics et à la gestion des déchets au quotidien, à la congestion liée au stationnement, et au droit d'accès aux trottoirs souvent envahis par les véhicules. Les actions des acteurs locaux restent assez limitées et parfois très controversées par les habitants des deux quartiers, qui contestent l'anarchie et réclament l'application de la loi ainsi que des règlements urbains et municipaux. La question de la gouvernance est au cœur de la problématique de la gestion de ces territoires urbains, où il existe une forte concentration d'espaces publics en manque d'entretien et parfois laissés à l'abandon.

4.2 Les habitants : des acteurs majeurs dans le renouvellement urbain

Les deux quartiers procurent à leurs usagers plusieurs sentiments, parmi lesquels les plus fréquemment cités sont la sécurité, le bien-être et le sentiment de confort. La dimension sécuritaire des quartiers d'El Menzah 1 et de la Cité Mahragène est une caractéristique saillante de la perception usagère. Ce sentiment ne semble pas lié à la dimension spatiale des deux quartiers, étant donné leur caractère ouvert, non clôturé et non surveillé, mais plutôt à la dimension sociale, en relation avec l'expérience vécue et le sentiment d'appartenance.



Fig. 12: Actions citoyennes de nettoyage et d'embellissement entreprises par les habitants des deux quartiers, source : « les amis d'El Menzah »

Ce sentiment d'attachement a suscité chez certains habitants un engagement actif envers leur lieu de résidence. Des associations se sont créées dans le but de valoriser ces quartiers et de mener des actions de sensibilisation et d'embellissement (voir fig.10) telles que l'association « Les amis d'El Menzah ». Soutenue par l'arrondissement d'El Menzah, ce collectif citoyen œuvre à la promotion du quartier en mettant en œuvre des actions de mise en valeur. Cette dimension participative et collaborative qui se développe entre les voisins, dans l'intérêt de leur quartier, contribue aux enjeux sociaux cruciaux pour la durabilité. Les habitants de ces deux quartiers jouent un rôle essentiel dans le renouvellement urbain durable de ces territoires urbains.

4.3 La réhabilitation architecturale et urbaine : réalité ou utopie ?

L'action de la réhabilitation vise à intégrer ces ensembles résidentiels dans une démarche durable visant à améliorer les conditions de vie des habitants et l'impact qu'a ce « parc social » sur l'environnement. Avec le temps, ces immeubles ont vieilli et se sont dégradés en raison du manque d'entretien. La question de la rénovation se pose notamment en raison des importantes modifications apportées aux immeubles collectifs, symboles de ces quartiers, ainsi que l'abandon de nombreux espaces urbains. Dans ce contexte, les franges des immeubles pourraient être réaménagés en jardins communautaires, offrant aux habitants des espaces de partage collectif propices à l'inclusion et à la résilience, une caractéristique essentielle de la durabilité, renforcée par la crise sanitaire et le confinement. Une autre priorité est l'amélioration de l'efficacité énergétique et la préservation de l'environnement, notamment par l'isolation des immeubles, malgré l'épaisseur de leurs façades, qui pourrait être optimisée jouant un rôle important pour garantir l'étanchéité à l'air.

En Europe, plusieurs exemples de réhabilitation d'architectures des « trente-glorieuses » sont des modèles à suivre pour une démarche locale. Franz Graf de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne a exploité la recherche académique pour développer des solutions à la « restauration approximative » (Graf, 2015) de l'architecture du 20^{ème} siècle. Une étude architecturale et énergétique des enveloppes des immeubles d'habitation de la cité du Lignon à Vernier, en Suisse, réalisée en collaboration avec le groupe Énergie de l'Institut des Sciences de l'Environnement de l'Université de Genève, a permis d'appliquer plusieurs critères et méthodes d'intervention pour améliorer l'efficacité énergétique sans altérer l'apparence extérieure de ce grand ensemble, unique en Suisse. Au niveau de l'espace urbain, il est envisageable de développer une approche résiliente dans le

quartier, qui va au-delà des aspects techniques liés à la gestion des risques, à la durabilité et à la consommation d'énergie. Cette approche pourrait favoriser une atmosphère qui encourage la convivialité et l'épanouissement à la fois dans la pratique individuelle et collective des espaces publics. A cet égard, des stratégies de développement résilient et durable pourraient inclure la rénovation des espaces inutilisés, la requalification des non-lieux et des épaisseurs bâties et vides, l'aménagement de mobiliers urbains, la gestion de la mobilité (personne à mobilité réduite, piétons, cyclistes et automobilistes).

Conscients que la société civile a un rôle à jouer dans ce « projet » de réhabilitation urbaine et architecturale, l'association docomomo Tunisie a organisé le 10 juin 2023 une action²⁸ de sensibilisation sur la valeur historique et patrimoniale du quartier d'El Menzah (voir fig.11). Outre le partage de connaissances sur ce quartier, l'objectif était également de réunir les acteurs locaux (le délégué d'El Menzah, les anciens maires de la commune et le collectif des citoyens) autour d'une rencontre-débat : *El Menzah, comment agir ?* L'approche participative et collaborative entre la société civile, les représentants des autorités compétentes et les habitants pourrait apporter des réponses à l'avenir de ce quartier et plaider en faveur de sa valorisation et de sa gestion à court, moyen et long terme. Cette action pourrait être reproduite à la cité Mahragène afin de sensibiliser les habitants à sa valeur historique et à l'importance de sa préservation.



Fig. 13: Article « Il faut sauver El Menzah » de Alya Hamza dans le journal la presse pour promouvoir l'action de docomomo Tunisie « El Menzah 1945-1940 : essai d'application d'un idéal moderne », source : journal La presse

5 Conclusions : Quel devenir pour ces quartiers ? valeur patrimoniale et réhabilitation durable

La question de la possible patrimonialisation de cet héritage urbain et architectural est au cœur de nos réflexions. A cet égard, il est essentiel de proposer des critères de sélection en lien avec la qualité architecturale et urbaine de ces ensembles résidentiels. Cette qualité est mesurable en prenant en compte divers aspects, notamment esthétiques, historiques, techniques, urbanistiques ainsi

²⁸ Cette action de sensibilisation nommée « El Menzah 1945-1970 : essai d'application d'un idéal moderne » a été essayée, à travers une programmation diversifiée entre expositions, conférences et rencontre-débat, de proposer des moments d'échanges entre habitants du quartier, instances publiques, acteurs de la société civile, architectes et chercheurs. L'idée était d'engager le débat et de proposer des débuts de réponses face au devenir de ce quartier.

que le confort qu'ils offrent aux habitants, à la fois à l'intérieur des logements et dans les espaces publics des quartiers. Dans cette perspective, la préservation de ces quartiers de la modernité tunisienne dépend de divers facteurs qui peuvent influencer ce choix. Il peut s'agir de données matérielles liées à un cadre légal et technique, en conformité avec les textes et les normes établies par les experts du patrimoine, tant au niveau national ou international. Cependant, il est également important de prendre en compte des éléments immatériels liés à l'expérience vécue, à la mémoire collective et aux ambiances perçues dans ces espaces au fil du temps.

Pour préserver ces quartiers, il est nécessaire de mettre en place une politique de patrimonialisation afin de témoigner de leur dimension culturelle et historique, qui constitue une marque de l'architecture tunisienne moderne. Les architectes modernistes se sont inspirés des doctrines des hygiénistes, des idéaux de la Charte d'Athènes et du fonctionnalisme corbuséen. Le regard porté sur leur travail oscille généralement entre l'enthousiasme lié à la reconnaissance d'une architecture contextualisée et innovante, et le déni de tout intérêt qualitatif envers cette architecture stigmatisée. Ainsi, les actions entreprises pour l'architecture du XXe siècle et notamment les logements sociaux collectifs, se situent entre deux extrêmes contradictoires : la patrimonialisation (Pouvreau, 2011) d'une part, et la démolition (Baudin & Genestier, 2006) d'autre part. Plusieurs spécialistes cherchent à promouvoir les qualités spatiales de cette production architecturale ainsi que le confort qu'elle a longtemps assuré à ses habitants. Cependant, si la démolition n'est pas envisagée, d'autres mesures peuvent être prises par les autorités publiques, notamment la réhabilitation. L'idée est donc de puiser dans le répertoire de ces héritages modernes du XXe siècle, qui ont été construits il y a plus de 70 ans et continuent à offrir à un cadre de vie de qualité à leurs habitants, mais aussi de proposer des démarches de réhabilitation²⁹ qui les confrontent aux enjeux contemporains de la durabilité, de l'inclusion, de la résilience et de la gouvernance.

Références

1. Abdelkafi, J., Réhabilitation de l'habitat ancien et régénération urbaine des centres historiques : Diagnostics et recommandations, Ministère de l'Équipement, de l'Aménagement du Territoire et du Développement Durable, octobre 2014
2. Arnold, F. : Le logement collectif : de la conception à la réhabilitation, Paris : Le moniteur, (2005).
3. Baudin, G., & Genestier, P., Faut-il vraiment démolir les grands ensembles ? *Espaces et Sociétés* (124-125), pp. 207-222, (2006).
4. Ben Abdelghani, N., De la colline « magnifiquement orientée » au « meuble effacé dans le mur ». La formule hygiéniste du logement moderne à l'épreuve du contexte Tunis 1943, *Al-Sabîl : Revue d'Histoire, d'Archéologie et d'architecture maghrébines* [En ligne], n°10, année 2020, URL : <http://www.al-sabil.tn/?p=7499>
5. Carrega, P., Charfi, S., & Dahech, S. Apport de l'imagerie spatiale dans l'étude multiscalaire de l'ilot de chaleur urbain à Tunis. 23^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Rennes. (2010).
6. Corbusier, L. La Chartes d'Athènes. Paris : Kraus Reprint, (1943).
7. Gharbi S. et Belakehal A., La patrimonialisation des ambiances modernistes. Cas du quartier d'El Menzah 1 à Tunis. *Revue Exercice(s) d'Architecture*, N°8, Mars, pp.40-47, (2020).

²⁹ Nous pouvons citer dans cette optique la thèse en cours de Ranya Farah Jaafar, dirigée par Leila Ammar, à l'École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis, portant sur « la réhabilitation durable des immeubles d'habitation de la période de la Reconstruction de l'après-guerre en Tunisie : performances énergétiques et adaptabilité usagère, cas d'étude : Immeubles d'habitation de la cité de l'air à Saint-Exupéry ».

8. Gharbi, S., Les intentions bioclimatiques des architectes de la Reconstruction tunisienne d'après-guerre : cas des logements collectifs d'El Menzah 1, dans « Energie Renouvelable et Applications », actes du colloque « Energies renouvelables et développement durable », Monastir, juillet 2019, disponible sur http://ipco-co.com/PET_Journal/images/52.pdf, (2019).
9. Gharbi, S., Belakehal, A., Les ambiances du quartier d'El Menzah : impacts de la morphologie urbaine et de la végétation sur le vécu des habitants, XXX^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie (A.I.C), « Climat, ville et environnement », Sfax, Tunisie, (2017).
10. Gharbi, S., Identification et caractérisation des ambiances d'un quartier d'habitat collectif de la période de la Reconstruction tunisienne : cas du quartier d'El Menzah 1 à Tunis, ex Crémieuxville. Tunis : Ecole d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis, (2017).
11. Gharbi, S. Belakehal, A., Vers une relecture d'un quartier de la Reconstruction tunisienne d'après-guerre : l'ambiance comme outil de revalorisation. Colloque international : Ambiances, demain (pp. 879-902). Vólos, Grèce : Réseau international sur les ambiances et Université de Thessalie. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01414155/document>, (2016).
12. Gordeeff, W. Le développement naturel de la ville de Tunis, zone nord El Menzah. L'Architecture d'aujourd'hui (60), p. 89, (1955, juin).
13. Graf, F., La cité du Lignon 1963-1971. Etude architecturale et stratégies d'intervention. Patrimoine et architecture, (2012, janvier).
14. Graf, F., La recherche et la restauration de l'architecture moderne. Amphithéâtre Marguerite de Navarre - Marcelin Berthelot, Paris, (2015, janvier 16).
15. Grafmeyer, Y., & Joseph, I., L'Ecole de Chicago. Naissance de l'écologie urbaine. Paris : Aubier, (1984).
16. Jalleli G. (2022), Filtrage ambiantal pour une architecture durable, pensez les démarches environnementales au prisme de la porosité, thèse de doctorat, Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme.
17. Musy, M., Le végétal en ville, un régulateur de climat ? Jardins, environnement et santé. 11^{ème} colloque scientifique de la SNHF, Paris : Société Nationale d'Horticulture de France, (2009).
18. Poulot, D., & Grange, D. J., L'esprit des lieux : le patrimoine et la cité. Grenoble : Presses universitaires de Grenoble, (1997).
19. Pouvreau, B., Faut-il « patrimonialiser » les grands ensembles ? Métropolitiques, (2011, mars 28).
20. Sebag, P., *Tunis: Histoire d'une ville*. Paris : Harmanttan, 1998
21. Serafini, T., & Vincendon, S., Grands-ensembles : démolir les clichés, pas les cités. Consulté le décembre 10, 2015, sur Libération : http://www.liberation.fr/france/2015/10/07/non-ce-n-est-pas-de-la-camelote-demolir-les-cliches-pas-les-cites-non-ce-n-est-pas-une-aberration-ur_1399302, (2015, octobre 7).

Assessing the climate response of vernacular settlements within the medina of Tunis

Habiba BENZARTI EP GHEDAS¹, Abdelmajid JEMNI², Eloi Coloma PICO¹

¹ Barcelona School of Architecture, Department of Architectural Representation and Visual Analysis I (EGA1), ETSAB, Catalan Polytechnic University, 08028 Barcelona, Espagne.

² Laboratory Studies of Thermal and Energy Systems, LESTE, Engineering National School of Monastir, University of Monastir, 5000, Tunisia
benzarti.habiba@yahoo.fr
abdelmajidjemni1@gmail.com
eloicoloma@eresus.com

Abstract. The 2020 World Habitat Day is centered on "Housing for All: A Better Urban Future." In line with this theme, this study aims to assess how traditional urban planning in Tunis responds to climate conditions. Its primary focus is to determine the effectiveness of this historical urban design as a model for low-energy and low-carbon initiatives. The research investigated multiple design strategies, like indoor and outdoor daylighting and natural ventilation, aiming to evaluate the efficiency of ancient city planning. Results highlight that the arrangement of houses in linear blocks with internal courtyards significantly promotes natural ventilation, solar energy absorption, and thermal comfort control. This compact urban structure proves beneficial in a semi-arid climate by reducing heat loss and creating a comfortable atmosphere within and outside the blocks, especially in the summer.

Keywords: Distribution of solar energy, Urban layout, Energy efficiency, Passive techniques, natural ventilation.

1 Introduction

This research work is a bioclimatic approach of the urban morphology in Medina. Some research studies have been done in this domain. For example, work research done for the 18th century consisted to examine adjustment modalities of urban forms with climate characteristics (PENEAU 1993). Further studies are to assess ancient Chinese theory termed Feng Shui that aims to harmonize environmental energy. This discipline arranges urban ancient buildings based on wind and streams. A climate adaptation in Feng Shui shows four aspects as following: orientation, protection against unfavorable wind, site selection and water (Chen, Yisheng, and Guowei 2012). Analysis results in South East of Algeria show that building adaptation to climate depends on the same building, behavior occupants, and the desired thermal comfort (Chen, Yisheng, and Guowei 2012). In this research, the temperature was used as a clue indicator of building thermal comfort and the total sunlight hours as a clue indicator of thermal comfort for urban space. In litterature review, many research reveal that Ecotect can be used as a scientific basis to investigate energy efficiency and to analyse climatic parameters (Benzarti Ghedas, Picó, and Jemni 2017), (Arranz et al. 2014), (Sadafi et al. 2011), (Faizi et al. 2011) (Yang, He, and Ye 2014b). In this paper, we opted for Ecotect for quantitative analysis. It contains a wide variety of comprehensive analyses of different climate physical parameters with an interactive and highly visual display. Ecotect is an analysis tool that enables designers to investigate building performance in the preliminary phase of conception

(Yang, He, and Ye 2014a). This software is often used for thermal analysis at the micro-scale. Our study uses this software to evaluate the thermal efficiency of ancient residential planning in Tunis city. The purpose of this study is to analyze design strategies and find a relation between the traditional urban forms and climate. This objective is divided to three steps: (1) identify passive design strategies of Tunis climate, (2) examine the various passive design strategies used in traditional dwelling and urban surroundings in the medina using Weather tool, (3) Verify climate response in internal and external spaces of the Medina using Ecotect software.

2 Materials and methods

a. Presentation of the case study:

The Medina of Tunis, located on a fertile plain in north-east Tunisia, bears witness to the beginnings of the Arab-Muslim cities of the Maghreb, dating back to 698 A.D. As the center of great dynasties, it reflects the interaction between the architecture, town planning and socio-cultural and economic influence of past civilisations. Covering 280 hectares, the Medina comprises the central medina dating from the 8th century and the 13th-century. Its souks, urban fabric, residential quarters and monuments of the best-preserved prototypes in the Islamic world. Our study is settled on residential neighborhoods. It is located near the Tourbet el Bey at 36°North latitude, 10° East longitude and an elevation of 12 m above.

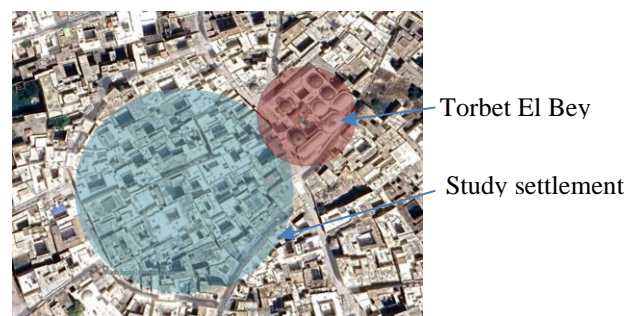


Fig. 1. Typical plan view of study settlement of Tunis Medina

b. Analysis process

This study evaluates the adaptation of ancient residential planning to climate by considering four main parameters: urban morphology, passive design techniques and meteorological data. In this context, different approaches are used in the literature as Li Yang et al. develop an efficient methodological approach that explores climate-responsive of residential planning. Thus, meteorological data and passive design strategies have been exploited using Ecotect Weather Tool. Then, solar radiation, solar orbit and natural ventilation are analyzed. Our methodological approach used method research previously identified by Li Yang et al, it is divided into two steps. The first one tries to understand Tunis city climate and to determine the passive design techniques. In this part, we collected and converted the weather file (CSV) to (WEA) format. The last format is readable by ECOTECH in WEATHER TOOL. After that, we analyzed the meteorological data of our study site in Medina. In the second step, we identified the efficient design strategies and examine passive solar heating and natural ventilation which are related to Tunis climate.

c. Analysis tools

ECOTECT is an expert tool for Meteorological data and environmental analysis with an interactive display and highly visual. Research results confirm that ECOTECT software provides a scientific basis for energy performance and climatic parameters analysis for passive designs (Benzarti Ghedas, Picó, and Jemni 2017), (Gou et al. 2015), (Faizi et al. 2011) (Yang et al., 2014). Then, we opted for ECOTECT and its integrated tool as WEATHER TOOL. Therefore, we used the last tool for hourly simulation of dry bulb temperature and relative humidity percentage. As well, we opted for this tool: (1) to identify beneficial passive design strategies based on Psychrometric chart (Benzarti Ghedas, Picó, and Jemni 2017), and (2) to examine the passive design strategies of the project based on Solar distribution and Prevailing winds chart. In addition, we rely on the ECOTECT to simulate hourly solar radiation and the indoor ambient temperature of our study case.

3 Results

a. Analysis of meteorological data and design strategies

The weather data results generated by the WEATHER TOOL of our study site are given in figures 2 and 3.

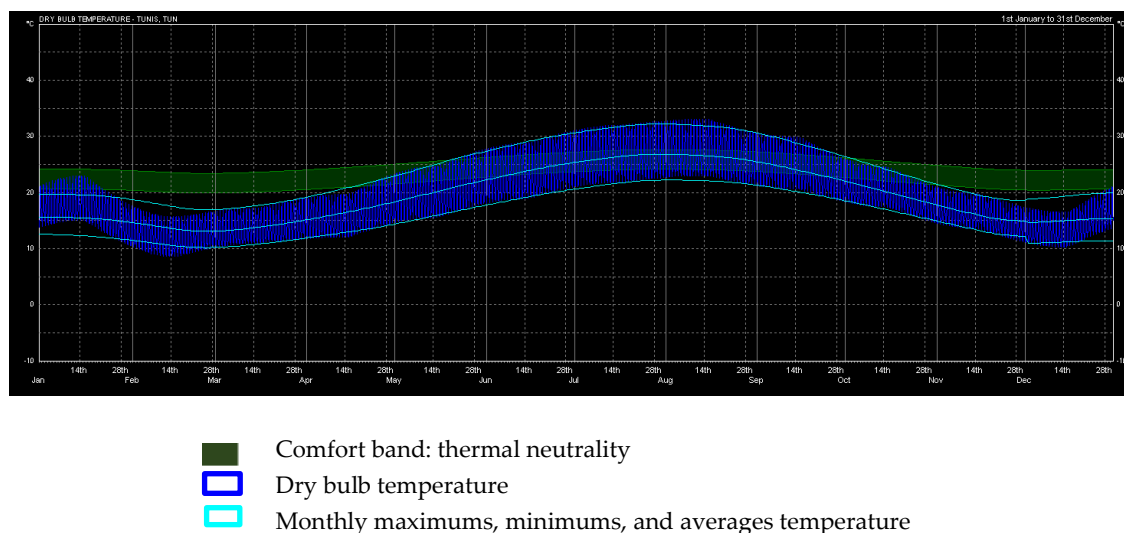


Fig. 2. Annual and Distribution of annual hourly dry-bulb temperature of Tunis Medina.

Figure 2 determines the hourly data, indicating the average coldest day on February 12th and the hottest day on August 20th. The average dry-bulb temperature throughout the year stands at approximately 25°C.

Figure 3 exhibits the average relative humidity, depicting a value of 65% during summer (from June 1st to August 31st) and 78% during winter (from December 1st to February 28th). Analysis of Figures 2 and 3 reveals a climate characterized by mild and wet conditions in winter but hot and less humid weather during summer in this region.

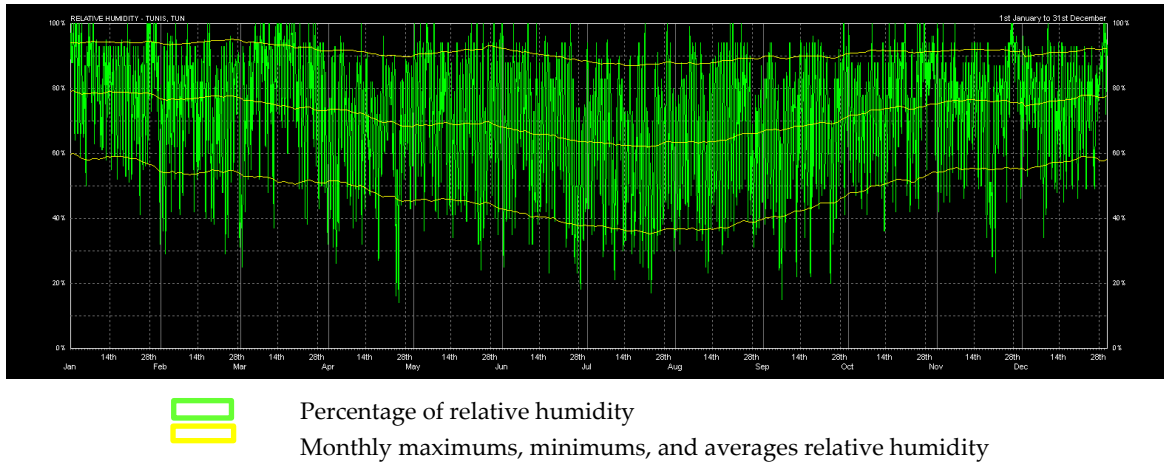


Fig.3. Distribution of annual hourly humidity of Tunis Medina.

The psychrometric chart graphically illustrates the thermal properties of air. The Weather tool in Ecotect provides this chart to analyze and improve passive design strategies. It defines a comfort zone generally accepted by most individuals (Benzarti Ghedas, Picó, and Jemni 2017), (Chambers 1970).

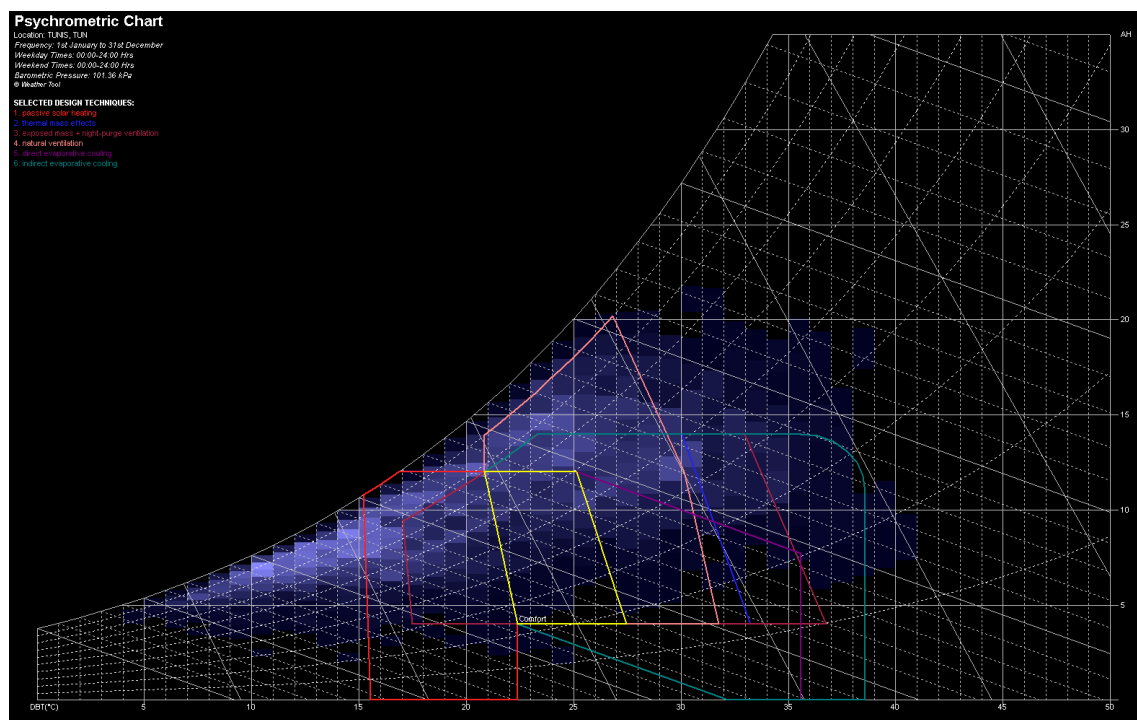


Fig.4 Effects of six passive design techniques: thermal mass effects, solar heating, exposed mass & night purge ventilation, direct evaporative cooling, natural ventilation, and indirect evaporative cooling. (Benzarti *et al.*, 2016)

Figure 4 demonstrates the impacts of six passive design techniques using various colors, such as thermal mass effects (blue), passive solar heating (red), exposed mass and night purge ventilation

(deep red), direct evaporative cooling (purple), natural ventilation (orange-red), and indirect evaporative cooling (green) (Benzarti Ghedas, Picó, and Jemni 2017), (Chan, Riffat, and Zhu 2010), (Geetha and Velra 2013), (Heidarinejad et al. 2009). A yellow-colored zone signifies the comfort zone, determined by factors like relative humidity, air and radiation temperatures, and airflow velocity. Individuals engaged in sedentary activities experience natural comfort within this zone without requiring additional heating or air conditioning (Benzarti Ghedas, Picó, and Jemni 2017). An analysis of the Tunis climate reveals an ambient temperature below the comfort threshold, emphasizing the necessity of adopting appropriate passive strategies. Yang's work emphasizes the importance of using suitable passive strategies to reduce the operational costs of mechanical systems. The highlighted lines in Figure 4 are the passive design strategies: exposed mass and night purge ventilation, passive solar heating, and natural ventilation, identified as most conducive to ensuring thermal comfort in the Tunis climate.

b. Project design analysis

Site radiation

In order to assess the effectiveness of the old urban morphology, it is necessary to simulate the distribution of solar radiation within the south-western cluster of the Medina. Therefore, we selected the Ecotect software to analyse the solar radiation distribution during both winter and summer periods. Ecotect was used due to its ability to accurately simulate the annual solar path and position at any given time, providing accurate statistics on the intensity of solar radiation within the design area.

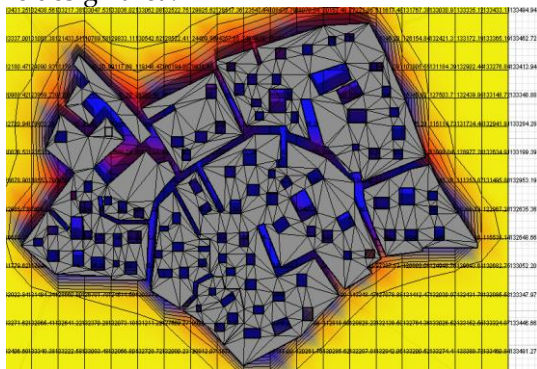


Fig.5. Solar radiation distribution of southwest clusters in the winter period.

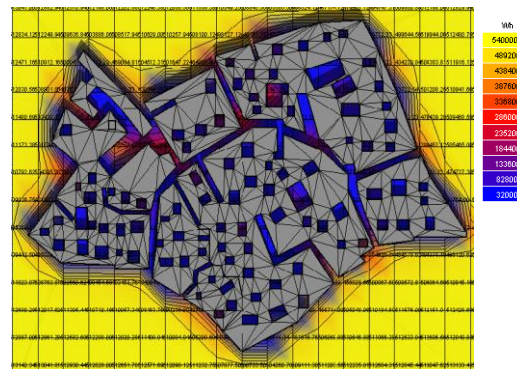


Fig.6. Solar radiation distribution of southwest cluster in the summer period.

Figures 5 and 6 illustrate the distribution of solar radiation within the southwest cluster during the summer and winter periods. Figure 5 shows the daily average solar radiation distribution within the southwest cluster, providing insight into the impact of urban form on external environmental radiation. Observations from Figure 5 highlight a decrease in solar radiation across the planning area during winter, with wider streets receiving more solar radiation, while courtyards and narrow streets receive less sunlight than in crossroads due to significant building shading. The graph shows that the cumulative solar radiation intensity in the outdoor environment ranges between 32000Wh and 54000 Wh, indicating an uncomfortable thermal quality during the winter seasons. On the other side, Figure 6 illustrates a more comfortable environment in courtyards and narrow streets during the summer period, due to their specific morphology. Narrow streets and urban

canyons provide mutual shading, while patio facades provide shading, creating a comfortable environment during periods of intense sunshine. The researchers found that the ratio of building height to street width (H/W) and the orientation of the sun significantly influence the thermal environment of the street and consequently the thermal sensation of people. As a result, the old urban morphology significantly improves outdoor comfort during the hottest periods. However, addressing thermal comfort in wider streets, where it is more difficult to ensure comfort in summer, requires efficient solutions such as galleries. Planting trees in crossroads is recommended to reduce discomfort caused by intense canopy exposure (Ali-Toudert and Mayer, 2007).

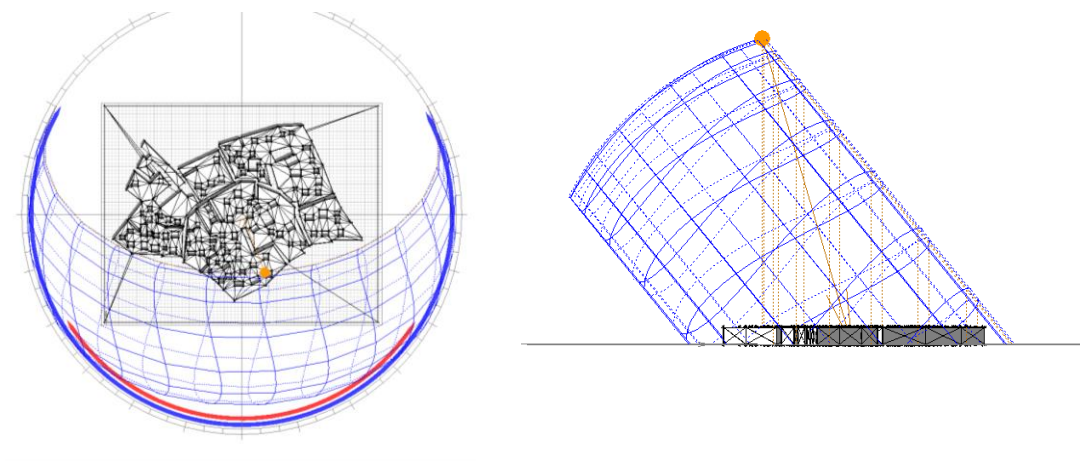


Fig. 7. Plan and section view illustrating the solar orbit projection and shade distribution of southwest clusters at 12h am on at the summer solstice.

In Figure 7, the red and blue arcs represent the range of azimuthal angles that the Sun traverses during summer and winter. The red arc indicates the summer path of the Sun, highlighting sunrise and sunset positions, while the blue arc indicates the winter path of the Sun. These arcs are used to highlight seasonal variations, helping designers to quickly understand the sun's path and make informed decisions in the early stages of design. Figure 7 also shows the shading distribution of buildings within the design area, demonstrating the relationships between neighboring buildings and their shading effects at a given time. This figure emphasizes that, despite the wide range of azimuth angles, terraces provide significant shading on the hottest days. In addition, patio areas have a better thermal quality than mood streets because they provide more shade to their occupants. Consequently, patios create a favorable microclimate during the summer period.

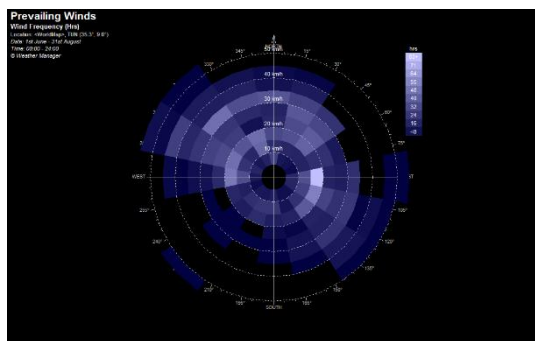


Fig. 10. The distribution of wind frequency, direction, and velocity respectively in summer.

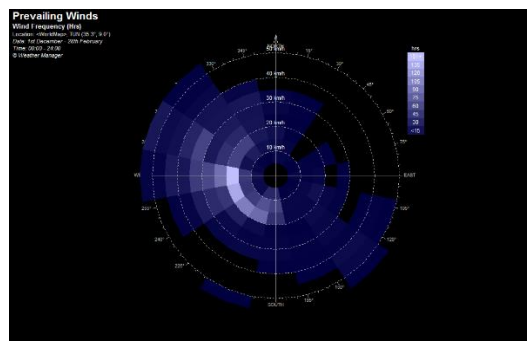


Fig. 11. The distribution of wind frequency, direction, and velocity respectively in winter.

In Figure 10, the main wind direction in summer is from the east, corresponding to the Levantine wind, which blows from the western Mediterranean Sea at a speed of 15 km/h for 80 hours in the summer period. This wind provides a natural cooling effect and humidity to ancient dwellings, contributing to a reduction in urban atmospheric temperature without any energy consumption, as noted by (Sato et al., 2008). Traditional dwellings consist of two buffer spaces: the main buffer associated with the entrance and a secondary space accessed through a baffle. The second buffer, when the entrance door is open, has a large opening that allows air circulation, which significantly improves the indoor environment in summer. In addition, the patio design promotes the use of local winds by incorporating double openings in the vertical facades, facilitating indoor airflow for improved comfort. This passive strategy optimizes natural ventilation by allowing cool air to enter through the bottom opening and hot air to exit through the top, effectively reducing temperatures, particularly in summer. It is worth noting, however, that the top opening can contribute to heat loss through the external facades in winter. In Figure 11, the prevailing winds during the winter period are from the west and south-west, identified as the Ponente and Libeccio winds respectively, with a speed of 20km/h. The design, including high streets and low windows on the vertical surfaces of the courtyard, acts as a shield against these prevailing winds. Ventilation serves as an ancient yet effective strategy, demonstrating how the design of ancient habitats was tailored to their climate, as illustrated by these wind patterns and their impact on the architecture's response to climatic needs especially in the summer period.

4 Conclusions

A simulation to assess bioclimatic architecture in a Mediterranean climate reveals that traditional design is more effective in summer than in winter. Traditional residential planning, influenced by vernacular architecture, relies heavily on natural ventilation, solar shading, thermal buffering and substantial thermal mass, proving to be highly efficient in hot summers. It is recommended that deciduous trees can be planted in the central areas of very wide streets or at crossroads to improve environmental comfort.

However, it requires further improvements for the winter season (Gou et al., 2015). Therefore, implementing heat insulation becomes imperative to achieve thermal comfort within the internal environment. In this climatic context, promoting direct solar radiation during the winter period becomes crucial for providing warm and physical comfort within indoor spaces. This can be achieved either directly, utilizing transparent openings for heating habitable spaces directly, or indirectly through intermediate spaces such as an atrium.

In ancient residential design, indoor thermal comfort mainly depends on the knowledge of the occupants, the physical characteristics of the building, the integration of the site and the use of the living space (Bennadji, 1999). The high thermal capacity within structures contributes significantly to the conservation of indoor temperatures and plays a crucial role in cooling, especially when combined with night ventilation (Ghrab-Morcos, Bouden and Franchisseur, 1993). Occupants of naturally ventilated buildings often cope with winter discomfort by wearing additional clothing or using handmade heating devices. Further improvements in the airtightness of the building will help to reduce heat loss (Morgan and de Dear, 2003). Assessing the effectiveness of traditional building methods, particularly in terms of thermal comfort and climatic responses, remains an important aspect of this research. Assessment of vernacular residential settlement planning introduced in this work can help urban planners to improve the thermal behavior of future planning and to produce sustainable cities. These planning actions influence the urban climate (Benzerzour et al. 2011). Moreover, the integration of courtyards in actually planning provide a thermal regulation in semi-arid region. Finally, we believe that passive design strategies used in the early phase of urban planning can reduce the carbon bill and improve the energy efficiency of the city.

References

1. Ali-Toudert, Fazia, and Helmut Mayer. 2007. "Effects of Asymmetry, Galleries, Overhanging Façades and Vegetation on Thermal Comfort in Urban Street Canyons." *Solar Energy* 81 (6): 742–54. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.10.007>.
2. Arranz, Beatriz, Edwin Rodríguez-Ubiñas, César Bedoya-Frutos, and Sergio Vega-Sánchez. 2014. "Evaluation of Three Solar and Daylighting Control Systems Based on Calumen II, Ecotect and Radiance Simulation Programmes to Obtain an Energy Efficient and Healthy Interior in the Experimental Building Prototype SD10." *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.082>.
3. Bennadji, Amar. 1999. "Climatic and Cultural Adaptation in Dry Region. Case Study Southeastern Algeria." University of Provence - Aix-Marseille. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01063273>.
4. Benzarti, Ghedas Habiba, Eloi Coloma Picó, and Jemni Abdelmajid. 2016. "Comparative Study of Meteorological Data Analysis Tools Based on Sousse Climate." *International Journal of Multidisciplinary and Current Research* 4 (May/June): 533–37. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/89908#.YTFElkMWVCw.mendeley>.
5. Benzarti Ghedas, Habiba, Coloma Eloi Picó, and Abdelmajid Jemni. 2017. "Modeling and Thermal Optimization of Residential Buildings Using BIM and Based on RTS Method : Application to Traditional and Standard House in Sousse City." Universitat Politècnica de Catalunya. <http://hdl.handle.net/10803/406007>.
6. Benzerzour, Mohamed, Valéry Masson, Dominique Groleau, and Aude Lemonsu. 2011. "Simulation of the Urban Climate Variations in Connection with the Transformations of the City of Nantes since the 17th Century." *Building and Environment* 46 (8): 1545–57. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.014>.
7. Chambers, A. B. 1970. "A Psychometric Chart for Physiological Research." *Journal of Applied Physiology* 29 (3): 406–12. <https://doi.org/10.1152/jappl.1970.29.3.406>.
8. Chan, Hoy Yen, Saffa B. Riffat, and Jie Zhu. 2010. "Review of Passive Solar Heating and Cooling Technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2): 781–89. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.030>.
9. Chen, Feng, Liu Yisheng, and Hua Guowei, eds. 2012. "LTLGB 2012: Proceedings of International Conference on Low-Carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings." In , LTLGB 2012. Vol. 1. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://www.amazon.com/LTLGB-2012-Proceedings-International-Transportation/dp/3642346502?asin=3642346502&revisionId=&format=4&depth=1>.
10. Dear, Rj De, and Gs Brager. 1998. "Towards an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference." *ASHRAE Transactions* 104: 145–67. http://repositories.cdlib.org/cedr/cbe/ieq/deDear1998_ThermComPref.
11. European committee for standarization. 2007. "Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy." Edited by British Standard. Brussels: authority of the Standards Policy and Strategy Committee. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/92485123-bf64-40e3-9387-9724a642eae8/en-15251-2007>.
12. Faizi, Foad, Marzieh Noorani, Abdolkarim Ghaedi, Mohammadjavad Mahdavinejad, and M Sc Student. 2011. "Design an Optimum Pattern of Orientation in Residential Complexes by Analyzing the Level of Energy Consumption (Case Study: Maskan Mehr Complexes, Tehran, Iran) Open Access under CC BY-NC-ND License."

- Procedia Engineering* 21: 0–000. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2128>.
13. Geetha, N. B., and R. Velra. 2013. "Novel Concept of Pcm Based Thermal Storage Integration in Active and Passive Cooling Systems for Energy Management in Buildings." *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering* 110 (1): 41–66. <https://doi.org/10.1080/01998595.2013.10594635>.
 14. Ghrab-Morcos, Nadia, Chiheb Bouden, and Robert Franchisseur. 1993. "Overheating Caused by Passive Solar Elements in Tunis. Effectiveness of Some Ways to Prevent It." *Renewable Energy* 3 (6–7): 801–11. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(93\)90088-X](https://doi.org/10.1016/0960-1481(93)90088-X).
 15. Gou, Shaoqing, Zhengrong Li, Qun Zhao, Vahid M. Nik, and Jean-Louis Scartezzini. 2015. "Climate Responsive Strategies of Traditional Dwellings Located in an Ancient Village in Hot Summer and Cold Winter Region of China." *Building and Environment* 86: 151–65. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.003>.
 16. Habiba Benzarti, Sami Ameer. 2010. "Etude Comparative Des Bâtiments Résidentiels et Contemporains Dans Le Sahel Tunisien." Sousse.
 17. Heidarinejad, Ghassem, Mojtaba Bozorgmehr, Shahram Delfani, and Jafar Esmaeelian. 2009. "Experimental Investigation of Two-Stage Indirect/Direct Evaporative Cooling System in Various Climatic Conditions." *Building and Environment* 44 (10): 2073–79. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.017>.
 18. Jagruthi, K., and M. Kannan. 2014. "LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THERMAL INSULATING BUILDING MATERIALS USING BUILDING INFORMATION MODELLING." *Journal of Engineering and Applied Sciences* 9 (3): 223–32.
 19. Liaison, Spls, Kenneth W Cooper, Stephen C Turner, Gwelen Paliaga, Brian M Lynch, Edward A Arens, Richard M Aynsley, et al. 2010. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ANSI Ashrae Standard 55*. 55th ed.
 20. Marsh, Andrew. 2003. "ECOTECT and EnergyPlus." *The Building Energy Simulation User News* 24 (6): 2. http://simulationresearch.lbl.gov/dirun/24n_d_1.pdf.
 21. Morgan, Craig, and Richard de Dear. 2003. "Weather, Clothing and Thermal Adaptation to Indoor Climate." *Climate Research* 24 (3): 267–84. <https://doi.org/10.3354/cr024267>.
 22. Nicol, J. F., and M. A. Humphreys. 2002. "Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings." In *Energy and Buildings*, 34:563–72. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3).
 23. Nicol, J. Fergus, and Mike Wilson. 2011. "A Critique of European Standard EN 15251: Strengths, Weaknesses and Lessons for Future Standards." *Building Research and Information* 39 (2): 183–93. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.556824>.
 24. Olesen, Bjarne W. 2007. "The Philosophy behind EN15251: Indoor Environmental Criteria for Design and Calculation of Energy Performance of Buildings." *Energy and Buildings* 39 (7): 740–49. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.011>.
 25. Ouertani, Aida. 2001. "Optimisation Thermique Énergétique Des Bâtiments, Considérations Technico-Économiques et Socio-Environnementales, Application Aux Logements Tunisiens." ENIT.
 26. PENEAU, Jean-Pierre. 1993. "Ajustement Climatique et Tracés Urbains Au Siècle Des Lumières." *Sciences et Techniques En Perspective* 24.
 27. Revault Jacques. 1971. *Palais et Demeures de Tunis, XVIIIe et XIXe Siècles - Persée*. CNRS. Vol. 1. Paris: CNRS. https://www.persee.fr/doc/etaf_0768-2352_1971_mon_1_1.
 28. Sadafi, Nasibeh, Elias Salleh, Lim Chin Haw, and Zaky Jaafar. 2011. "Evaluating Thermal Effects of Internal Courtyard in a Tropical Terrace House by Computational Simulation." *Energy and Buildings* 43 (4): 887–93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.009>.
 29. Sato, Taiki, Shuzo Murakami, Ryoza Ooka, and Shinji Yoshida. 2008. "Analysis of Regional Characteristics of the Atmospheric Heat Balance in the Tokyo Metropolitan Area in Summer." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (10–11): 1640–54. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.004>.
 30. Yang, Li, Bao jie He, and Miao Ye. 2014a. "The Application of Solar Technologies in Building Energy Efficiency: BISE Design in Solar-Powered Residential Buildings." *Technology in Society* 38 (August): 111–18. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2014.03.002>.
 31. Yang, Li, Bao Jie He, and Miao Ye. 2014b. "Application Research of ECOTECT in Residential Estate Planning." *Energy and Buildings* 72 (April): 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.040>.
 32. Yu, Jinghua, Changzhi Yang, and Liwei Tian. 2008. "Low-Energy Envelope Design of Residential Building in Hot Summer and Cold Winter Zone in China." *Energy and Buildings* 40 (8): 1536–46. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.020>.

AXE 5 : BATIMENT ET ARCHITECTURE DURABLE



L’empreinte carbone comme outil de décision au choix des produits de construction – Dr. Ahmed Jelidi – ENIT

« La simulation de l’analyse du cycle de vie d’un bâtiment suivant les différentes phases montre que contrairement aux idées reçues c’est la phase d’utilisation qui a le plus grand impact »

Dr. Jelidi s’est penché sur l’empreinte carbone des bâtiments et celle des différents produits de construction dont l’empreinte carbone est parfois très élevée.

Il a également soulevé la problématique liée au risque d’épuisement de la matière première en substances utiles d’ici 2100. Selon lui, il faut donc passer à l’action !

L’analyse de cette empreinte carbone peut donc être un outil d’aide à la décision afin de minimiser l’impact environnemental des constructions et ce par l’analyse de cycle de vie possible grâce à plusieurs plateformes et logiciels.

L’analyse de cycle de vie regroupe trois grands axes : la détérioration des ressources, des écosystèmes et de la santé de l’Homme. Ces axes impliquent plusieurs points à savoir l’épuisement des ressources, l’occupation des sols, le changement climatique, la destruction de la couche d’ozone, l’acidification, l’eutrophisation, écotoxicité et toxicité humaine.

Dr. Jelidi a partagé une étude sur l’analyse de cycle de vie d’un bâtiment suivant les différentes phases à savoir la démolition, la rénovation, l’utilisation et la conception. Cette étude a pu montrer que c’est la phase d’utilisation qui a le plus grand impact.

Multi-university practicum teaching for a paradigm shift: Pioneering an international competition of sustainable architecture in Tunisia

Emna BCHIR ¹, Leila CHENNOUFI ²

¹ ENAU Université Tunis Carthage, laboratoire VDEC, Tunisia

² Sustainability Frameworks, United States of America
bchiremna@gmail.com

Abstract. With the 2015 United Nation's SDG leading the way and the multiple crises of water scarcity, energy prices, climate change and biodiversity loss looming strong, it has become essential to address these issues in Architectural education. At ENAU, this teaching is as its early beginnings, but an innovative initiative was implemented in the form of a participation in an American, inter-disciplinary competition to conceive a Net-Zero building. Immersed in the professional world, students and professors benefited from multiple online technical trainings that covered the range of design and construction elements. Thanks to the *Solar Decathlon Design Challenge* (SD) competition, participants were able to experience the key principles of sustainable development and integrate renewable energy and energy efficiency as principal considerations into architectural design.

The work approach was operational research one, where a real project was to be conceived following a specific methodology. We describe here this pioneering experiment conducted over three consecutive years in Tunisia starting in 2021. We also share the feedback from the various participants: professors, students and the *Design Partners* (the architect of the project). In this article, we highlight the following gains (i) technical learning thanks to the wide range of tools and software made available, (ii) local market understanding including financial and regulatory aspects of the architectural project, (iii) soft skills development for all the students involved, (iv) interdisciplinary work experience and (v) learning the latest updates on sustainable architecture internationally. While the competition was highly educational and formative, it is essential to highlight its complexity, firstly due to the substantial time and effort it required from the students concomitantly to their university studies commitments. Secondly the professors involved invested significantly in the process, to keep abreast with the latest progress internationally sustainable architecture and to access information in a local context that is bereft of labeled ecological materials and their technical specifications. The success of this competition heavily depends on the *Faculty Lead's* time investment and breadth of connections within the local context of architectural production.

Given the benefits this competition brings, it would be unfortunate to limit it to just a few students. The opportunity should be extended to a much higher number, though SD's integration in the curriculum. The more architects are educated on ecological and sustainability themes and on software and tools, the sooner these themes will be integrated in design processes, making buildings more efficient for the least cost.

Key words: Pedagogy Innovation, Architecture, Sustainability, Net Zero, Renewable Energy

1. Introduction

Around the world, architecture is going through an important paradigm shift: buildings must shift from energy consumers, to zero energy or better to energy producers. These deep changes also affect buildings' water cycles, because water requires energy and because of the water scarcity crisis. Hence, tomorrow's architecture must be sustainable and the teaching of sustainability in architecture has become an urgency to educate future architects and help them mobilize builders

and occupants to design a better tomorrow. This is highly relevant as this architectural approach was just introduced by the International Union of Architects (IUA) in its 2023 education charter update, recommending a shift to responsible architectural education that underpins Sustainable human settlements. The 2015 United Nations' (UN) 17 Sustainable Development Goals (SDGs) underpins the spirit of the charter, as it implies members of the IUA have a responsibility to improve the education and training of future architects so they can adequately respond to the global societal expectation of the 21st century, and face fundamental crisis such as climate change. Sustainable architecture is often understood as an ecological architecture that has the smallest energy, water and waste footprint possible while fulfilling its occupants needs. A sustainable approach first requires to have a local approach that addresses the issues of the local context. It then permeates all phases of design from initial concept, programming of spaces, planning and all the way to construction. Sustainable thinking is not limited to the environment and must consider form, function, climate, geography and society, in a holistic architectural approach.

As a reminder, in its opening speech of the 27th Conference of Parties of the UNFCCC (COP27) in 2022, the UN Secretary General summed-up the urgency saying "We are on a highway to climate hell with our foot still on the accelerator."

This highlights the importance of providing today and tomorrow's architects with the tools to conceive sustainable and culturally appropriate human settlements. Ensuring that tomorrow's architects are active stakeholders of our adaptation to direct and indirect impacts of climate change requires a revamping of the National School of Architecture and Urbanism's (ENAU by its French acronym) curricula, from theoretical subject matters to practical teaching dispensed in studio classes. As we wait for the reform announced a few years ago, we will cover in this article the teaching of projects in studio applying a sustainable development approach, through our pilot participations in an international inter-disciplinary competition. This competition addresses the design of a real net-zero building, including collaboration with other universities' students and exposing students to the real-world actors and aspects of building design and construction: on one hand architects, engineers, and construction industry actors and on the other hand the regulatory framework and the local market in terms of materials and costs.

This paper will first present in section 2 the competition process and procedures and its content. We will then share in section 3 the pedagogical and scientific outcomes of the competition for the coaching team, while section 4 will detail the outcomes for participating students. In section 5, we will discuss options to replicate and generalize the experience so more students benefit from the it and section 6 will close the paper with the conclusion.

2. An international interdisciplinary competition as alternative for innovative teaching of the architectural project

The leading team identified in 2020 an international student competition that focuses on the design of a zero-energy buildings in collaborative, multidisciplinary teams of students. The competition approach also included connecting students with the real world of building production such as architects, engineers, building industry professionals, energy and materials regulatory aspects as well as costs. This approach was innovative in many ways, and was deemed worth exploring for the benefit of Tunisian students of the ENAU.

This experiment was conducted three consecutive years, and for the first time in Tunisia starting in 2021, under the leadership of Emna Bchir, project manager, and with the support of Leila Chenoufi in an advisory role. The project went to its term in 2021 with the Sol-Up team, which made it to the finals with students from the ENAU, the National Engineering School of Monastir (ENIM), the Design School of Den-Den (ESSTED), the Agronomy Institute of Sousse (ISACM) and the Institute for Higher Studies of Business (IHEC). In 2022, the experiment was renewed with Shine Tunisia, with a team from the ENAU and the ENIM that concluded at the pitch stage. In 2023, the ENAU's Dar-Ability team reached the semi-final stage, the engineering members planned for the subsequent stage did not have a chance to participate. We will come back to this later.

Whether it is ecology, sustainability or regenerative architecture, these concepts have in common a responsible attitude towards the environment that underpins our own existence. Implementing these concepts certainly requires specific technical knowledge, but also involves a practical dimension that necessitate a real connection with a territory, its regulatory framework, its local market and its environmental specificities. However, addressing all these dimensions in a concrete manner in an architectural project in studio is a challenge for our students because during all their architectural education at the ENAU (and many other colleges in the world), students are invited to conceive and design freely, with few real constraints such as financial, legal, energy consumption or usage of local materials.

A fundamental shift must happen to achieve sustainability, as we must acknowledge that building resilience to climatic chocs or embedding energy efficiency are matters of design and conception before being matters of insulation or other complementary add-ons. In other words, designing an architectural product with objectives of resilience or energy efficiency, is as important as conceiving an original architectural concept that follows the formal standards of the likes of Zaha Hadid or Franck Gehry.

How are we then to think of the key principals of sustainable development in architecture? How do we shift to integrating renewable energy and energy efficiency as key design inputs to architectural projects? How can we achieve this quality education that owes it to the future to prepare architects to develop new solutions for today and tomorrow, as we are and will be undoubtedly affected by a new set of complex challenges that will affect the functional and social aspects of human settlements.

These challenges call on many elements integrated in the SDGs, such as the world's urbanization, environmental degradation, the crisis of lodging, urban services and social infrastructure in some cases, the effect of all of the above on health and public welfare, and the growing exclusion of architects from the construction projects³⁰?

To date at ENAU and at the level of project learning, the question of sustainability is touched upon by everyone and no one, in the sense that it relies on individual initiative during the whole curriculum in the various studios in the absence of a sustainability teaching strategy developed and implemented for the students' multi-year curriculum. For this reason, we think the idea of participating in an interdisciplinary competition where the student is enriched with targeted technical teachings and immersed in concrete issues while being "accompanied" by real project actors,

³⁰ UNESCO/UIA CHARTER FOR ARCHITECTURAL EDUCATION, 2023 revision proposal of the 2021 edition (soon to be published)

appears as an interesting alternative to be implemented in parallel with the existing university curriculum.

The findings from the Solar Decathlon (SD) pilots highlight the potential such an approach may bring, as it was strengthened by the inclusion of other disciplines and institutions and was an opportunity to dive into environmental challenges that are crucial to the Tunisian context.

These challenges include: (i) the energy crisis as Tunisia has limited oil and gas resources for energy production, which it must steer away from because of their high GHG emissions and cost, (ii) the water crisis with a worsening scarcity situation due to demographic growth, inadequate management and climate change, (iii) floods due to non-compliance with building code, increased impermeabilization of soils and increase of extreme weather events, (iv) insufficient focus on local plant and tree species in urban and natural environment, which would reduce watering while maintaining canopy and soil cover for shade and local fauna that depends on these ecosystems.

As elsewhere in the world the water-energy nexus is strong and these resources are inter-dependent.

This competition was initiated by the United States Department of Energy to design and build “zero energy” buildings applying a methodology organized in the following ten challenges, also called contests.



Fig 14: Contests- (SD schema)

The project is conducted in close relation with the professional world, as the design is done in collaboration with the various project stakeholders. This approach confronts the students with the realities of an actual project, never considered in the curriculum. The architect helps with orientating the team of students during the conceptual design to ensure the architectural solution is adequate for the client or market and integrates the various constraints such as local materials or investment, operating and maintenance costs, which are all innovative compared with the ENAU curriculum. The budget is managed based on calculations of cost and return on investment of a zero-energy design - initially costlier, but cheaper in the long run. Financial aspects are essential and it is key to develop the students' mental agility vis-a-vis investment costs versus operating versus maintenance costs, and the concepts of return on investment. A mastery of these concepts are essential to the future architects' capacity to convince clients of the worthiness of eco-designs' higher upfront costs in exchange for lower long-term costs.

The Market Analysis challenge teaches the students to negotiate and research information related to the costs of the various project elements in order to compare them with the overall project costs, evaluate trade-offs and select which elements to invest in.

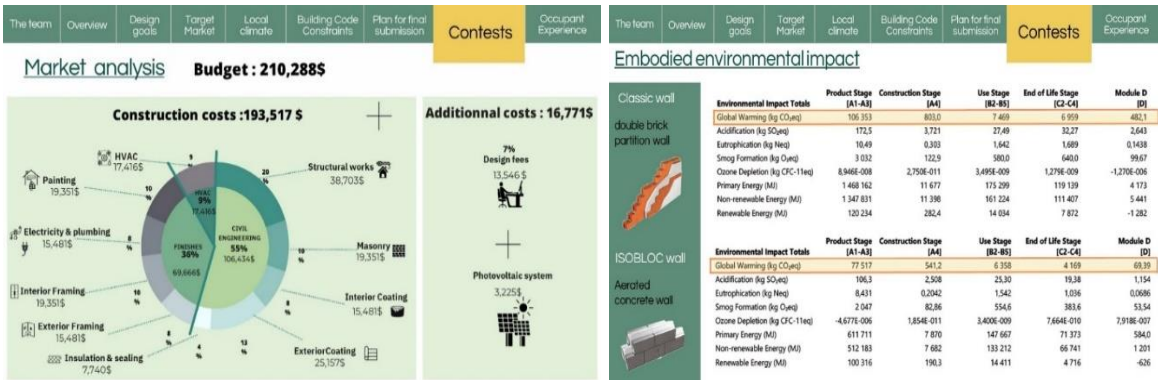


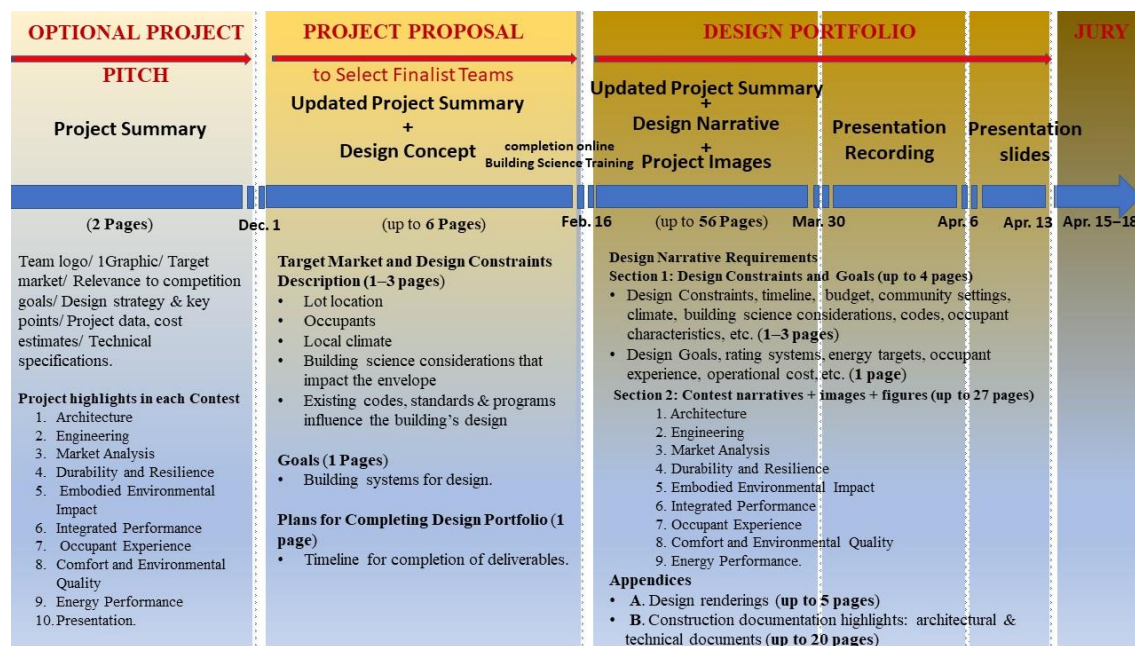
Fig 15: Exemple Challenges of the house project of 2023

Several complimentary software are made available to the team for the duration of the competition, allowing for the evaluation of the life cycles of materials and their impact on the environment and the testing of various alternatives. The best option is then selected based on thermal properties, carbon footprint and environmental impact. The software allowed for energy models to be run for various heating and cooling options.

The range of available software opened a world of opportunities for our student architects, usually limited to issues of shape, function, structure and culture of an architectural project. With such tools architects can go early on through several early conceptual design iterations before involving engineers. This opens the possibility for the architect to retain his/her vision and imprint on project modeling and to avoid divergences or contradiction of the later involvement of engineers who are disconnected from the heart of the architectural design and its objectives. This provides for better and easier inter-disciplinary collaboration.

The competition includes several sections, limits the size of the projects and requires that students take the online training "Building Science Education" which delivers a certificate. The training is provided regularly during the competition and a series of webinars is also imparted, some of which are compulsory, in order to cover various aspects of sustainable architecture and construction. Subjects taught range from: (i) buildings life cycle evaluation from a global perspective, (ii) importance of measuring the impact of buildings' life cycle, available tools and their limits, (iii) innovative materials from different angles and at various development stages, (iv) integration of the impact of buildings' life cycle in commercial building internationally, (v) Impact of construction and demolition waste and means available to address this challenge, such as reuse and recycle.

In terms of process, the design competition includes 3 major submittal steps. The first submittal consists of a short summary that is not compulsory but recommended to get acquainted with the requirements of the project and various challenges. Initial target energy consumption values have to be shared at this early stage. The second submittal consist of an updated project summary, the key design concept elements as well as the planned activities and timeline for completion. Finally, the last submittal includes a completed package of design narrative, drawings and other appendices highlighting how the project addresses the various challenges listed. The last elements are related to presentation & communication videos and slides, submitted ahead of the formal presentation to a jury.



tation to a jury. The figure below provides further details on deliverables and timelines.

Fig 16: Deliverables and Timelines

Hence architecture students collaborate early on with students from various other disciplines. The costs and technical constraints raised by engineers in the early stages in order to estimate actual values and make their own calculations is a novelty for ENAU students. Moreover, the methodology required by the competition encourages collaboration with various professional stakeholder of the projects and helps students realize the complexity of a deep conceptual design process that is anchored in the idiosyncrasies and challenges of local realities.

3. Pedagogical and scientific outcomes of the competition for the coaching team

The US Department of Energy considers the SD competition as one of its most successful actions. Every year the competition is adjusted to reflect, amongst else, feedback and proposals received from faculty leads during the review meeting, where it is highlighted how enriching the competition was for all stakeholders. In terms of our participation as architects, we will review outcomes for professors and the institution, for students and for our Design Partners.

3.1. Outcomes for professors and the institution

SD established its reputation as a successful education program for zero-energy buildings and built partnerships with governmental or private organizations such as the National Energy Education Development Project, which is dedicated to training professors and students to energy efficiency, and the Energy Information Administration or Heatspring, which provide trainings to fight climate change. Pedagogical resources and online courses, free or for a fee, are offered either directly by SD or through its partners.

Compulsory student courses are also offered to professors with the associated certificate. These courses consist of the following module: (i) *Buildings and Energy*, (ii) *Zero Energy Buildings*, (iii) *Building Envelope*, (iv) *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*, (v) *Lighting*, (vi) *Plug and Process Loads*, et (vii) *Renewable Energy and Zero Energy Buildings*, for an estimated time investment of nine hours. Six additional hours of optional additional modules are made available for those who wish to dive deeper on some issues. Another 6 hours of technical webinars are given during the competition as an add-on to the formal 9 hours of formal classes.

There is also an opportunity for professors to enrich their knowledge and deepen their expertise by (i) taking the training modules and attending personally the webinars provided to students, and (ii) accessing other webinars and innovative pedagogical resources and most recent technical tools. This level of involvement facilitates the understanding of what is expected in terms of content at this international level of competition, and what the latest research and findings are to address the climate crisis. A system of supporting mentors who participated in prior competitions is available to teams, and professors (faculty leads) are called on to become mentors themselves for other teams in subsequent years, opening themselves up to other world universities.

In addition to the above, SD sets-up online presentations regularly with industry stakeholders thereby constituting for the architectural teacher a true experience of operational research, connected to the world of professional architectural production where students can be guided one step at a time.

In the 2021 competition where we conceived a major office-building project of 8000 m², we addressed complex issues of structure and air conditioning. Given their lack of knowledge of fieldwork, students required close guidance and daily coordination and follow-up to keep track and to link the learning from SD to their curriculum.

This close follow-up led the faculty lead to keep abreast with the latest novelties and technical progress, and to play a moderation role between the various disciplines. It also required multiple outreach and communication efforts with relevant industry stakeholders, which remain difficult to access and comprehend for students. This is because the language used is essentially technical or requires understanding of fieldwork, construction and the regulatory framework.

Every year, SD conducts review meetings with all the faculty members who participated in the competition. On that occasion, everyone recognizes the massive effort this competition required from faculty, even though their role is in theory just a “remote” guidance effort of heavily involved student teams.

All of this to say that SD contributes to the continual education of faculty leads by (i) supporting their development of innovative teachings, (ii) opening windows to the international world of architectural production, (iii) improving their understanding of the climate change issues and latest progress, (iv) creating a network of international peers to whom to refer to and (v) the opportunity to practice English in a professional context.

Faculty members who open themselves to the professional world are certainly enriched and, as result, so are students and all the university that opens itself to its environment and reaches cutting edge levels. The ENAU also gained in notoriety and, from the perspective of SD, is a university that demonstrated persistence and a real interest for sustainable development, which deserves support. This manifested itself in 2023, when SD approached the ENAU lead faculty from the prior year to offer them free enrollment to the competition.

The SD competition also brought to Design Partners updated sustainability-related information and knowledge based on student and faculty's investigations. For instance, the competition was akin to applied research and had a prescribed methodology, our team screened the field and the market of sustainable building in terms of local materials. When asked about key outcomes of the research from his perspective, our Design Partner of 2021 and 2023 T. Ben Hadid had this to say *"It makes us face our sad reality. Regulations bared changed in 20 years, when we spoke about solar energy enthusiastically"*.

No regulations require building designs to meet a minimum of energy efficiency, not even in terms of insulation. Only regulations can require everyone to engage down this path: Architects, engineers, industries and entrepreneur. Very saddened, he noted the CTMCCV's situation and means deteriorated significantly compared with the 80s. He adds *"Unfortunately with regards to materials, we cannot as private sector architects, offer client to use ones that have not been formally labeled by the State. This is a risk only the State can take, requiring studies and perspective"*.

With I. Mimita, our 2022 Partner, the team did not pass the pitch stage. I. Mimita thought the methodology was interesting and was looking forward to comparing his field work and project certification experience with the SD approach implemented by the team. Though we did not reach more advanced stages, we see that participating in such an international competition with new tools, can have positive outcomes for professionals as well.

4. Pedagogical and scientific outcomes of the competition for students

The US Department of Energy's data shows that more than 25000 students competed in 2022 in over 40 countries to conceive affordable efficient buildings that are powered by renewable energies. The outcomes of this immersive experience for students were multiple and vast and touch on a variety of subject that are not included in their curriculum in any year. Moreover, the advantages of immersive learning in the professional world are widely known.

First, students had to take a number of the online courses and webinars mentioned in the previous section, which means at least 15 hours of courses that lead to a training certificate. A former SD competition student who is now living and working out of Tunisia reports that *"The online courses were very well structured and provided relevant information. I use this learning to this day in my work."*

Secondly, they found out the importance of the regulatory framework, whether for project design or in terms of paradigm shift. They realized that in terms of sustainability, Tunisian regulation is in its infancy and essentially consist of (i) law 2004-72 on energy efficiency and renewable energy and (ii) law 2009-7 on energy management in buildings and associated decrees and *arrêtés*. Water-related legislation in the building sector is even less developed and limited to a few decrees on rainwater harvesting in public buildings. Students noted that labels and other incentives such as Ecobat for the design of high-efficiency buildings or Promo-Isol for the promotion of thermal insulation of roofs in new and existing buildings are interesting but insufficient because systemic change does not occur in the absence of regulatory requirements. They were also able to compare

with other countries and understand where regulation should lean in short order given the increased price and scarcity of both resources.

Beyond the somewhat limited regulatory constraints, students were faced with actual cost and feasibility limitations during the design. This was the first-time students were faced with these important and real restrictions to architectural production, beyond the form, function and structure they are used to. They had the opportunity to prepare an estimate of the capital costs of construction, as well as the operating and maintenance costs in order to calculate the short-term cost overage of ecological construction. They also estimated the medium-term return on investment thanks to reduced maintenance and operating costs, empowering them to see the value of sustainable design. This exercise demonstrated the usefulness of a design process that integrates a long-term vision of a building's life and consider maintenance and operating costs on top of investment costs (and ideally deconstruction at the end of life).

Some of the local learnings included the exploration of the Technical Center for Construction Ceramics and Glass (CTMCCV³¹ by its French Acronym) in order to better understand the labeling system. They found out that few materials obtained an eco-label in Tunisia, despite the wishes and efforts of some industries to push forward and that the incentives in place are insufficient to promote eco-materials development and labeling, particularly that paradoxically, the government continues to subsidize – directly or indirectly – energy intensive materials such as red brick and cement.

Every year in the framework of the SD competition, the team has conducted comparative studies of materials options that are available in the market. Each team hence tested, calculated and selected the best combination of materials to optimize insulation of the envelope. It was invariably arduous due to the absence of appropriate sustainability-related data and information on local materials. It was difficult and sometimes impossible to find the information and coefficients value that are needed for software calculations and energy modeling.

Everyone noted how much of the precious little time available was spent on trying to recover what is elsewhere considered as basic data, time that would have been better spent on high value-added analytical work.

Another major discovery for our students was related to advanced systems to reduce water consumption and recycling/reusing greywater and rainwater, in the context of one of the worst droughts in Tunisia ever. Again, little to no information was available on locally available solutions, while there was clearly a range of options becoming mainstream elsewhere in the world. We hope this will inspire some to try and creatively address this challenge with local solutions.

While students normally focus on architectural aspects as part of their curriculum, they realized the value of an integrated approach to effectively reduce the ecological footprint of a building. They discovered the multiple dimensions of such an approach, contextualized to Tunisia's specific challenges: reducing the consumption of water, energy and material resources; thinking of materials and buildings' construction lifecycle; favoring local labor; integrating the restoration of ecosystems and rewilding to eliminate watering and support endemic fauna and flora; maintaining green areas to allow for water infiltration; harvesting rain water for reuse and to reduce the intensity of floods that result from the high rate of impervious soil surface; etc.

³¹ Centre technique des matériaux de construction, de la céramique et du verre

In terms of energy, students were able to use new technical tools to better apprehend comfort in the building, notably thermal comfort. This is key for sustainability, particularly the cooling element which is a lot more expensive in Tunisia given the climatic conditions.

With one of teams, we compared VRV systems to heat pump systems and chose the former based on the following criteria: (i) easy maintenance (no leaks), (ii) least energy consumption, (iii) flexibility in usage (can heat some spaces while cooling others at the same time), which may be useful when the sun on one side can create significant temperature differentials inside a building, and (iv) auditory comfort (heat pumps available in Tunisia are very noisy and have a negative impact on the auditory comfort of occupants). Another team explored the possibility of using geothermal heat pump with a French firm that guided the calculation effort.

However, additional systems are necessary in case of extreme temperatures, which requires further analysis. This shows that innovation and optimization are iterative processes that necessitate patience and persistence.

Students reported that one of the major learning came from the collaboration with partners from other disciplines such as civil or fluid engineers *“working as part of a multidisciplinary team was a great experience that allowed to learn new notions of engineering, landscaping, design, image and more”*.

Initial communication was not yielding the expected results, which required from the students to improve the clarity of their verbal and written communication, understand that participants from other disciplines use a different lingo and not to assume that they understand the architectural approach to buildings. These collaborations led to time-consuming back and forth exchanges during the process of improving the design of the sustainability features of the building.

A former student participant shared with us that *“Unfortunately communication difficulties added unforeseen workload”*.

The international platform of sustainability actors that were made available to the students is another major gain. The SD management team organized an online final jury open to all where all the actors involved in the building industry were invited.

An active platform was also put in place and made available to students for six months following the jury, in order to encourage students and faculty to connect with industry players around the world. We were able to see what peers have produced and find out how far all dimensions of sustainability have come around the world.

Yet another significant value-added of SD was the access to cutting age eco-design software, which students were able to self-learn and test out to conduct part of the eco-design and iterative process themselves.

One of the students confirms that *“I am about to obtain a certification on a software that I discovered thanks to SD”*. The more architects are trained on the energy and sustainability issues and will know how to use this type of software, the earlier these aspects will be integrated in the conceptual design, making buildings more efficient at a lower cost. Currently, the engineering, whether structural or other, starts too late to allow maximization of eco-gains and influence design.

Thanks to the project, students learned and practiced a methodical approach to sustainability, requiring deep thinking on a series of themes essential to eco-design.

This methodical approach ensures that nothing is forgotten and that all opportunities to maximize eco-design are systematically evaluated. One of the students puts it this way *“Participating in the SD competition made me aware of the impact of our architectural choices on the planet et gave me tools to improve conceptual design”*.

Finally, this competition allowed student to practice English (reading, writing and speaking) and to learn technical notions in English in their field of studies.

They also had a chance to hear their peers from North America and elsewhere present their work and speak about themselves in English. Unlike in our culture, Americans are trained early on soft skills and encouraged to speak in public and present themselves well, so any opportunity given to our students to practice these skills and learn from their peers can only be positive over the long term.

5. Discussion: options to replicate and generalize the experience

Though this experience was undeniably enriching at all levels, it remained arduous with results that could be improved: finalist stage in 2021, pitch-stage in 2022 and semi-finalists in 2023. The challenges are firstly due to the high degree of involvement of faculty members. The competition effort had to be performed on top of the faculty's existing teaching workload, because it was not part of a curriculum.



Fig 17: Office Building Project 2021. Perspective and Solar analysis

In the review meeting conducted with all the faculty leads at the end of the competition, whom the SD management team called “the heroes in the shadow”, all participants had the same conclusion: in addition to the intrinsic difficulties of managing as large and diverse teams (for example 19 students and 6 faculty were involved in the 2021 project team), even the smallest project remains complex with significant work to be accomplished (we estimate 100-350 hours for the faculty lead). All faculty leads agree that the competition should be, whenever possible be integrated in the curriculum’s studio in order to maximize the chances of finishing the project, satisfying clients as much as possible, and possibly winning the competition. SD managers are currently strongly suggesting that this occurs wherever possible.

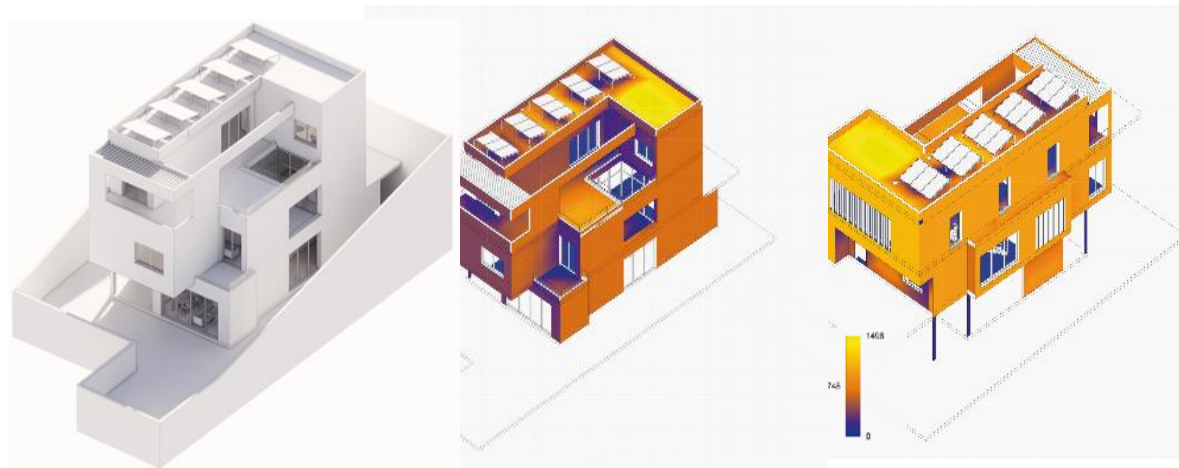


Fig 18: Independent House Project 2023. Perspective and Solar analysis

Secondly, for the ENAU students, the participation at the competition required between 100-250 hours of work depending on whether the project reached the final or not. This is due to the complexity of the project that must go through multiple iterative processes and to the size of the teams. This extra-load conflicted with their curriculum’s study and submittal requirements. The feedback from competition participants was that the team that worked more comfortably were the ones that had included the project in their curriculum.

Thirdly in the case of Tunisia, the difficulty resides in the context and unequal work and study environments compared with other countries: (i) little to no high performing materials available on the Tunisian market, (ii) when materials exist, there is no or insufficient information provided by the industry for use in calculations, (iii) there are no software cutting-edge and/or “add-ons” or complementary applications, (iv) there is little to no experience with energy-related software, and (v) weak regulatory framework.

Finally, the fourth barrier is the language. Even if students went beyond themselves to compensate, English remains a barrier. This is particularly true during oral presentations, but it also dramatically slows down reading comprehension and writing.

The SD initiative was presented to the ENAU (administration, faculty and students) at a good time. It was put forward as part of the ongoing reform reflection that has started through a questionnaire sent to all ENAU stakeholders. We hope this proposal will inspire ideas, not only for the

architecture studio programs, but also for the theory classes. Indeed, to ensure a quality education, it is necessary to have a strong knowledge of the technical tools and the key sustainability issues as they relate to actual projects.

6. Conclusions

For students, the SD competition was a practical experience and a unique training opportunity that helped them prepare for their future work environment, through a hands-on experience around key aspects of sustainability in construction such as resource efficiency and the integration of renewable energy, to be considered at the earliest staged of conceptual design. This initiative was highly valuable to students and faculty alike, on technical and scientific aspects as a wide range of knowledge, approaches and practical tools were made available to all.

On the soft skills side, the experience was unique for students as they had a chance to improve on skills rarely called on during their curriculum: technical writing in English, communicating and working with other disciplines, and speaking in English in front of a high-level panel of international professionals. Field activities such as collecting information from professionals developed their behavioral skills and enriched their technical vocabulary. They might not perceive it immediately, but this experience will have changed forever the way they conceive. They have gained an initial understanding of sustainability issues related to water and energy in particular and this is essential in light of the multiple climatic and environmental crisis ahead!

On the faculty side, SD was a significant investment in time and effort, undertaken as a result of their wish and interest in a high value opportunity for continual learning. Another aspect to be noted is that the team's success not only depends on the faculty's time investment to learn and guide students, but also on the faculty's breadth of connections with the various actors of architectural production and construction in Tunisia. The role of Design Partner was of high value both in terms of its guidance on the architectural design and in terms of the range of connections it allowed with engineering firms and the building industry sector.

Given the success of this 3-year competition pilot, validated by participating students, it would be a pity to limit it to a few students. It would be beneficial to extend the opportunity to many more, and for some aspects to all, students, but the additional workload for students (project and online training) and for the faculty to guide them is such that it should be integrated as part of the university curriculum to ensure its success.

What we will remember above all in this SD annual competition adventure, because it is an adventure, is the consolidation of knowledge: the options not tested one year will be tested the following one et every year is enriched by the experience of the prior ones.

It is about learning... It is about consolidating... It is about transmission.

References

1. Burian, (Steven), & Johnson, (William), & Montague, (Fred), & Holt (Arrin), & Nielson, (Jim), & David, (Rachel) (2008, June), "Multidiscipline Team Teaching Approach To Enhance Project Based Learning Of Sustainable Design" Paper presented at 2008 Annual Conference & Exposition, Pittsburgh, Pennsylvania. PP 13.915.1 - 13.915.14, <https://peer.asee.org/3876> last accessed 20/09/2023
2. Chansomsak, S. "Sustainable architecture : architecture as sustainability". In: Foliente G. et al. (Eds.) *Proceeding of the World Sustainable Building Conference SB08*, (Vol. 2, pp. 2294-2301). Produced primarily as a web-based product (2008), https://www.researchgate.net/publication/292103944_Sustainable_Architecture_Architecture_as_Sustainability, last accessed 20/09/2023.

3. Contal (Marie-Hélène) et Revedin (Jana), *Architectures durables, Une nouvelle éthique pour l'architecture et la ville*, Edition Le Moniteur, Paris, 2009, 179 Pages.
4. Desjardins (Anouk), Millette (Louise) et Bélanger (Eric), « Intégration du développement durable par les principes et la démarche de conception dans un cours projet », In *Vertigo la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Hors-série 13 | janvier 2013, mis en ligne le 10 avril 2012, <https://journals.openedition.org/vertigo/11606?lang=fr>, last accessed 02/10/2023.
5. Desjardins (Anouk), Millette (Louise) et Bélanger (Eric), "The Challenge Of Teaching Sustainable Development Using A Multidisciplinary Project With Integrated Process" Design Paper presented at 2010 *Annual Conference & Exposition*, Louisville, Kentucky. 10.18260/1-2—15787, <https://peer.asee.org/15787>, last accessed 15/02/2023.
6. GIACHETTA (Andrea), PERINI (Katia), MAGLIOCCO (Adriano), "Diffusion of Sustainable Construction Practices. A Case of International Cooperation", *Open Journal of Energy Efficiency*, 2013, 2, 46-52. doi: 10.4236/ojee.2013.21008. https://www.scirp.org/html/8-2650021_29016.htm last accessed 10/10/2022.
7. O'Neill1(Daniel W.), Fanning (Andrew L.), Lamb (William F.), Steinberger (Julia K.), "A good life for all within planetary boundaries". In *Nature Sustainability*, 1 (2), 2018, PP. 88-95. ISSN 2398-9629, <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0021-4>, last accessed 10/10/2023.
8. Petersen, A., Gartman, M. and Corvidae, J. The Economics of Zero-Energy Homes: Single-Family Insights. Rocky Mountain Institute, 2019. www.rmi.org/economics-of-zero-energy-homes, last accessed 25/03/2023.
9. American Institute of Architects - Framework for Design Excellence, http://content.aia.org/sites/default/files/2020-08/Framework_for_design_excellence_v3.pdf, last accessed 12/09/2023.
10. Architect's Guide to Building Performance Integrating performance simulation in the design process: https://content.aia.org/sites/default/files/2019-06/AIA_BPSSGuide_2019_FINAL.pdf, last accessed 20/03/2023.
11. *Green Construction: A Growing Global Trend How to build green today and what to expect tomorrow* <https://a.storyblok.com/f/64835/x/7ddfd5224/emea-green-construction-v1.pdf> last accessed 10/10/2023.
12. *Le carré bleu- La formation à l'architecture durable*, N° 3-4, (2010). http://www.lecarre-bleu.eu/PDF_INTERA%20COLLEZIONE%20LCB/FRAPN02_CARR_2010_3-4.pdf, last accessed 01/10/2023.
13. Rapport final de l'Elaboration des référentiels de notation des cibles du label ECO-BAT, ANME et AFD, Juin 2013, <http://www.acte.tn/sites/default/files/inline-files/Label-ECO-BAT-.pdf>, last accessed 15/10/2023.
14. Appel des Nations Unies pour une architecture et des infrastructures durables, <https://unece.org/media/press/371411>, last accessed 15/10/2023.
15. Arrêté des Bureaux du 23 juillet 2008. http://www.acte.tn/sites/default/files/inline-files/Arrete%202008_693-1-BUREAUX.pdf, last accessed 22/12/2022.
16. Official Website of Solar Decathlon, <https://www.solardecathlon.gov/>, last accessed 10/10/2023.

L'architecture circulaire au service du développement durable

Imène SLAMA ¹, Racha BEN ABDELJELIL ²

¹ Ecole Nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis (ENAU), ERA, Tunisia

² Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Sousse (FLSH Sousse), AnTeSaPer UR 16ES11, Tunisie

E-mails : imene.slama@isbas.rnu.tn

racha_gamha@yahoo.com

Résumé. Cet article se préoccupe de la thématique de l'architecture circulaire. Il présente un état de l'art concernant l'architecture circulaire dans le monde, résume ses plus importants principes et évalue la transposabilité de ce nouveau paradigme en Tunisie. À travers cette recherche, nous avons voulu rassembler des exemples qui pourront résumer les principes de l'architecture circulaire. Ce nouveau concept est apparu en corrélation avec l'économie circulaire qui est encore à ses débuts en Tunisie. Nous avons également effectué une enquête auprès des architectes tunisiens pour vérifier si ce concept d'architecture circulaire est adopté en partie par les architectes tunisiens et si ces derniers l'intègrent dans leurs conceptions architecturales ? Cette enquête vise également à connaître le point de vue de ces concepteurs concernant ce paradigme. Nos résultats dévoilent en premier lieu les différents principes de l'architecture circulaire notamment la flexibilité et la réversibilité fonctionnelle et structurelle, l'utilisation des matériaux circulaires issus du réemploi et/ou du recyclage, l'optimisation du stock bâti, la déconstruction au lieu de la démolition, la préservation des ressources naturelles et l'économie d'énergie. Le deuxième volet des résultats concerne l'interprétation de l'enquête que nous avons menée auprès des concepteurs tunisiens. Nous présentons des statistiques relatives à leur point de vue par rapport à cette architecture circulaire. À travers les différentes réponses des questionnés, nous avons étudié la transposabilité de cette architecture dans le contexte tunisien et dégagé les contraintes majeures qui bloquent l'applicabilité de l'économie circulaire dans le domaine de la construction en Tunisie. Les résultats de l'enquête ont montré que le concept de l'architecture circulaire et ses principes sont méconnus par la majorité des architectes tunisiens quoiqu'ils recommandent la promotion de l'économie circulaire dans le domaine du bâtiment. L'applicabilité de l'architecture circulaire dans les conjonctures actuelles en Tunisie est possible en prenant des mesures relatives à la réglementation, la préparation des infrastructures nécessaires telles que la création des plates formes et les unités de réemploi et de recyclage des matériaux. En conclusion, l'architecture circulaire est un modèle conceptuel qui pourrait être adopté et promu en Tunisie en sollicitant la recherche scientifique et en sensibilisant les différents acteurs dans le domaine de la construction.

Mots clés : Développement durable, architecture circulaire, éco-conception, économie circulaire.

1 Introduction

Les premières formes de l'économie circulaire sont apparues en 1972 après la publication du rapport "*The limits to growth*"³² à Rome. Le terme d'économie circulaire voit le jour pour la première fois dans un ouvrage scientifique publié en 1990 « *Economic of Natural Ressources and the Environnement* » de David W.Pearce et R.Kerry Turner³³.

L'économie circulaire s'inspire des écosystèmes qui sont en boucle fermée. Parmi ses piliers fixés par l'ADEME, on note l'architecture circulaire qui nécessite une réflexion radicale sur le cycle de vie des bâtiments et leurs matériaux de construction. L'un des principes de la construction circulaire est que le matériau acquiert une longue vie et est tourné dans une boucle ce qui évite la pression sur les ressources naturelles³⁴.

Grégoire Bignier, dans son livre intitulé « architecture et économie, ce que l'économie circulaire fait à l'architecture », tisse le lien entre l'architecture et l'économie circulaire. Selon lui, les trois fondements de l'économie circulaire seraient : l'écologie industrielle, le recyclage et l'économie sociale et solidaire³⁵. L'articulation de ces trois notions constituerait selon l'auteur un outil considérable mis à la disposition des architectes pour adopter une approche circulaire de l'architecture.

La Tunisie a commencé sa transition vers une économie circulaire en participant au programme Switchmed financé par l'Union Européenne et lancé en 2013. Il s'agit d'un programme qui vise à promouvoir des économies productives, circulaires et partagées en méditerranée. Switchmed « soutient les décideurs politiques, les petites et moyennes entreprises éco-innovantes, les industries, les start-ups et les entrepreneurs des pays du sud de la Méditerranée, qui ont identifié la création d'emplois et la protection des ressources naturelles comme des questions prioritaires qui contribuent également à leur stabilité économique. »³⁶ Dans le cadre de ce programme un plan d'action national tunisien sur les modes de consommation et de production durables (PAN-MCPD) a été établi en 2016. Ce plan d'action a permis de dresser un état des lieux concernant les modes de consommation et de production durables (MCPD) en Tunisie et d'élaborer deux plans décennaux relatifs aux secteurs du tourisme et de l'agroalimentaire.

Concernant la gestion des déchets, des filières à responsabilité élargie des producteurs (REP) ont été créées (ECO-Lef en 1997, Eco-Zit en 2002, Eco-batterie et D3E en 2005, Eco-pneu et Eco-piles). Dans le domaine de la construction, la gestion des déchets est tout à son début avec la signature en 2022 d'une convention de partenariat entre les représentants tunisiens du Ministère de l'Équipement, de l'habitat et de l'aménagement du territoire (MEHAT), du Ministère des Affaires Locales

³² MEADOWS D. and al, *The limits to growth*, Universe books, (1972).

³³ Fénard, G. "Conception circulaire et réemploi en architecture, expertises et acteurs : le rôle du valoriste. Mémoire de mastère en Architecture. Université de Liège. (2020) P.8. En ligne : <http://hdl.handle.net/2268.2/12556>.

³⁴ Fénard, G. (2020). P.12.

³⁵ Selon Grégoire Bignier, on parle d'écologie industrielle lorsque les déchets d'une usine constitueront la matière première de l'usine de proximité jusqu'à la fermeture de la boucle. Se basant sur ce principe, l'écologie industrielle est une notion intimement liée à l'espace et dont le fonctionnement obéit à une boucle fermée. Le recyclage est avancé par l'auteur comme une notion liée au temps. L'économie sociale et solidaire quant à elle, engage le monde associatif et les institutions. Consulter à ce propos : <https://www.ecologiehumaine.eu/architecture-et-economie-ce-que-leconomie-circulaire-fait-a-larchitecture-podcast/>. Consulté le 18/10/2023

³⁶ <https://switchmed.eu/fr/>. Consulté le 19/10/2023. Voir également à ce propos : Fersi, C et al. Circular economy in Tunisia. In Kumar Gosh, S. et Kumar Gosh, S. (ed). Circular economy: recent trends in global perspective. (2021). P 129. En ligne: DOI: 10.1007/978-981-16-0913-8_4. Consulté le 19/10/23.

et de l'Environnement (MALE), et leurs homologues français du ministère de l'Équipement et du Logement et du Centre français d'Études, d'Expertise, d'Environnement, de Mobilité et d'Aménagement (CEREMA). Cette convention est faite dans le cadre du projet de recherche RE-MED³⁷. Elle a consisté à mettre en œuvre un programme d'élimination des déchets de construction et de démolition et ce, en les transformant en matériaux qui seront utilisés dans la construction des routes.

Rappelons que le secteur du bâtiment en Tunisie est responsable de la production d'un grand taux de déchets provenant de la construction ou de la démolition des bâtiments. Une étude réalisée en 2004 estime que le taux de déchets provenant de la démolition dans les trois grandes villes Sfax, Sousse et Tunis est égal à 0.7tonnes/habitant/an, voire 4 millions de tonnes par an³⁸.

Penser et concevoir l'architecture autrement est plus que nécessaire afin de réduire son impact environnemental. La majorité de la sphère professionnelle tunisienne a tendance à concevoir les projets architecturaux selon un modèle linéaire³⁹. En d'autres termes, un projet architectural est une réponse à un besoin exprimé par un client et traduit par un programme. Le concepteur tente de répondre à ce programme en tenant compte de toutes les nécessités des futurs usagers en termes de confort et de bien-être. Dans un souci de « développement durable »⁴⁰ ou « soutenable », le concepteur fera attention aux choix des matériaux de construction et une réflexion sera apportée afin d'intégrer des procédés techniques permettant une économie d'énergie lors de l'occupation du bâtiment ou également la production d'énergie verte. Mais, qu'en est-il de la fin de vie du projet ? Il sera ou bien reconverti et réaffecté ou bien complètement démoli et transporté vers les dépotoirs⁴¹.

Penser l'architecture selon un modèle circulaire serait-il une des solutions à envisager afin de diminuer l'impact de nos constructions sur l'environnement ?

Il est à préciser que selon les propos de Bechara Helal, professeur adjoint à l'École d'architecture de l'Université de Montréal, l'architecture circulaire « invite à envisager dès le départ la possibilité que l'usage du bâtiment change ou qu'il soit démonté et que ses matériaux soient réutilisés »⁴².

A travers cet article et face aux différents constats cités plus haut à propos de la Tunisie, nous nous posons les questions suivantes :

³⁷ Le projet RE-MED « Application de l'innovation pour le développement de l'économie circulaire pour une construction durable en Méditerranée » implique la Tunisie, la France, l'Italie et le Liban. Il fait partie du programme européen IEV CTF de coopération transfrontalière en Méditerranée. Consulter à ce propos https://ue-tunisie.org/projet-192-10-413_application-de-l-innovation-pour-le-developpement-de-l-econo.html

³⁸ GIZ. Rapport sur la gestion des déchets solides en Tunisie. (2014). P.29. En ligne : <http://www.collectivites-locales.gov.tn/wp-content/uploads/2019/04/rapportsweepnet.pdf>.

³⁹ Il y a également l'économie linéaire qui obéit au slogan take-make-waste, une approche héritée de la révolution industrielle.

⁴⁰ « Suite au choc pétrolier de 1979 et à la constatation des limites des ressources fossiles, la notion de développement durable apparaît dans le rapport de Brundtland en 1987 avec pour objectif de proposer un développement compatible avec les besoins des futures générations en pérennisant l'utilisation des ressources. Depuis les années 90, l'architecture durable était synonyme d'économie d'énergie et de performance énergétique ». Dautremont, C et al. Le BIM6D comme levier pour une architecture circulaire. In SHS Web of Conferences. Vol. 47. (2018). En ligne : <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701005>.

⁴¹ A ce propos, une étude diagnostique réalisée par le ministère des affaires locales et de l'environnement a dénombré en 2016, 313 dépotoirs pour les déchets de construction (DDC) dont 289 anarchiques dans le gouvernorat de Tunis, 55 dépotoirs dont 49 anarchiques dans le gouvernorat de Sousse et 53 dépotoirs dont 52 anarchiques dans le gouvernorat de Sfax.

⁴² VENNE, J.F. Impact environnemental, L'avenir est circulaire, In Esquisses, Vers une architecture circulaire, printemps. Vol.33. n°1. (2022). p19.

Quels sont les principes fondamentaux de l'architecture circulaire ? Quel est l'avis de la sphère professionnelle tunisienne (les architectes) concernant cette architecture ? Sa transposabilité en Tunisie serait-elle possible ?

De ce fait, notre article s'articule autour de deux axes : le premier a pour objectif de constituer un état de l'art concernant l'architecture circulaire à travers le monde. Le second axe vise une contextualisation de ce nouveau paradigme qui est l'architecture circulaire en évaluant les possibilités de sa transposabilité en Tunisie.

2 Méthodologie

La méthodologie s'appuie à la fois sur une revue de littérature et sur un questionnaire adressé aux concepteurs tunisiens. La revue de littérature servira à définir les principes de l'architecture circulaire en se basant sur des projets architecturaux construits à travers le monde. Le questionnaire permettra d'étudier les modalités de transposabilité de l'architecture circulaire dans le contexte Tunisien et l'avis de la sphère professionnelle tunisienne envers ce nouveau paradigme de l'architecture.

Notre questionnaire compte vingt-deux questions adressées à un échantillon d'architectes tunisiens. Le public questionné est composé d'architectes exerçant dans le secteur public et privé ainsi que des enseignants chercheurs architectes. Ce choix de l'échantillon est justifié par le fait que nous avons voulu recueillir les avis d'architectes toutes catégories confondues. A ce stade de notre étude et s'agissant d'une enquête préliminaire concernant l'architecture circulaire en Tunisie, nous avons fait le choix de s'adresser uniquement aux principaux acteurs de l'élaboration d'un projet d'architecture.

Le questionnaire⁴³ a comporté trois types de questions : des questions ouvertes permettant aux concepteurs de s'exprimer librement, des questions à choix multiples et des questions fermées.

Les huit premières questions ont interrogé la sphère professionnelle sur la connaissance du concept de l'architecture circulaire et le rapport qui la relie avec l'économie circulaire.

Les questions qui ont suivi étaient sur la faisabilité de l'architecture circulaire et l'applicabilité de ses principes dans le contexte tunisien.

À la fin du questionnaire, des questions posées sur la tranche d'âge, le sexe et le secteur d'activité ont permis de recueillir les variables sociodémographiques et professionnelles des concepteurs questionnés.

Le questionnaire a été élaboré moyennant l'application Google Forms et a été envoyé aux concepteurs via les réseaux sociaux.

Le traitement des données des questions à choix multiples et fermées a été effectué à l'aide du logiciel Excel 2019.

3 Résultats

3.1 Principes de l'architecture circulaire:

À partir de notre état de l'art, nous avons pu dégager les principes suivants de l'architecture circulaire:

⁴³ Le contenu du questionnaire est consultable sur ce lien : <https://forms.gle/5D3DaRVYA3dVNmQB8>

3.1.1. Flexibilité et réversibilité fonctionnelle et structurelle :

La conception d'un projet est une phase primordiale durant laquelle se font l'étude et les choix conceptuels et techniques d'un projet d'architecture. Concevoir un bâtiment selon le modèle circulaire signifie que ce dernier peut être utilisé d'une manière flexible et réversible⁴⁴ en termes d'usage et de structure.

La réversibilité est définie comme étant "la capacité programmée d'un ouvrage neuf à changer facilement de destination (bureaux, logements, activités...) grâce à une conception qui minimise, par anticipation, l'ampleur et le coût des adaptations."⁴⁵ Cette réversibilité peut être à la fois fonctionnelle et constructive (structurelle). En d'autres termes, les procédés employés pour la construction d'un bâtiment réversible peuvent être démontés facilement et réutilisés pour un éventuel réaménagement lors du changement d'usage de ce dernier. Ils peuvent également servir à d'autres chantiers. Stewart Brand⁴⁶ a illustré les différentes strates qui composent le bâtiment dans un schéma servant aujourd'hui de référence pour la construction circulaire. Selon cet écrivain américain, le bâtiment en tant que tel n'existe pas, seules les strates existent et ont une durée de vie différente les unes des autres. Ces strates sont catégorisées en six familles : le site sur lequel se trouve le bâtiment (éternel), la structure ou les fondations et les murs porteurs (30 à 300 ans), les façades et autres surfaces extérieures du bâtiment (20 ans), les tuyaux et canalisations du bâtiment (7-15 ans), l'aménagement du plan (les murs de séparation, les plafonds, les revêtements de sol et les portes) (3-30 ans) et le mobilier (quelques jours à quelques années)⁴⁷. Plus la ligne représentant la strate est épaisse, plus sa durée de vie est longue (Fig.1).

Brand cite dans son ouvrage: "Site dominates the Structure, which dominates the Skin, which dominates the Services, which dominates the Space Plan, which dominates the Stuff"⁴⁸.

La séparation des strates dans un projet architectural est un critère dont il faut tenir compte dès la phase de conception afin de garantir la réversibilité et la flexibilité de ce dernier et par la suite sa circularité. En effet, les strates ayant une durée de vie plus courte ne doivent pas être de préférence enfermées ou encastrées dans des strates à durée de vie plus longue. Dans le cas contraire, il serait plus difficile d'assurer la réversibilité et la flexibilité du bâtiment sans avoir fait de gros travaux de rénovation et avoir produit une quantité considérable de déchets dont il faut s'en préoccuper.

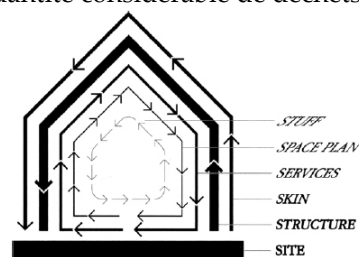


Fig. 1. Shearing layers of change
© Brand, S. (1995)

⁴⁴ La flexibilité et la réversibilité structurelle et fonctionnelle ont été adoptées au XX^e siècle au cours des années de l'après-guerre. L'enjeu était de reconstruire les villes ruinées et bombardées mais actuellement l'enjeu est de préserver en urgence les ressources naturelles et l'environnement.

⁴⁵ Rubin, P et al. Construire réversible. In Canal Architecture. (2017). P10.

⁴⁶ Brand, S. How Buildings Learn: What Happens After They're. 1st edition. Viking Press (1995).

⁴⁷ <https://www.circubuild.be/fr/faq/qu-entend-on-par-stratification-en-lien-avec-la-construction-circulaire/>. Consulté le 29/03/2023.

⁴⁸ Brand, S. (1995). P47.

À titre d'exemples de l'applicabilité du principe de la flexibilité et de la réversibilité fonctionnelle et structurelle, nous citons le projet B.R.I.C⁴⁹ construit dans la région Bruxelloise en Belgique (Fig.2). Il s'agit d'un projet réalisé à l'EFPP⁵⁰ selon le principe d'un bâtiment qui sera montable, démontable et évolutif en termes d'usage. 180 élèves du centre ont participé à la réalisation de ce bâtiment. Ce projet a duré trois ans durant lesquels il a changé d'usage. La première année, le bâtiment a servi à une activité tertiaire (des bureaux). La seconde année, le bâtiment a abrité une activité commerciale et la troisième année, un laboratoire d'acoustique. La surface du bâtiment a évolué de 70 m² à 130 m².



Fig. 2. Le projet B.R.I.C en Belgique

© <https://www.bamb2020.eu/topics/pilot-cases-in-bamb/bric/>

3.1.2. Utilisation des matériaux circulaires : Réemploi, réutilisation et/ou recyclage des matériaux :

Le choix de matériaux circulaires pour un projet donné peut être abordé de deux manières qui peuvent être séparées ou combinées pour un même projet. Le concepteur pourra opter pour le choix de matériaux issus du réemploi et/ ou du recyclage. Le réemploi des matériaux évite le gaspillage, économise les ressources naturelles et diminue l'impact de la construction sur l'environnement.

La 2^{ème} alternative consiste à employer des matériaux biosourcés⁵¹ et géosourcés⁵² à faible empreinte environnementale. Ces matériaux doivent être bien évidemment de la région afin qu'ils soient des matériaux bas-carbone.

Le projet résidentiel « *The Resource Rows* » construit près de Copenhague au Danemark est le premier exemple choisi pour illustrer le principe de l'utilisation de matériaux circulaires (Fig.3). Les matériaux de ce projet proviennent de bâtiments désaffectés à proximité. En effet, les façades du projet sont constituées de panneaux de murs récupérés, découpés et agencés pour composer l'ornementation de ces dernières. Des composants du projet sont également fabriqués à partir d'aluminium, de bois recyclés, de verre et de cadres de fenêtres récupérés.

Le second exemple est le Circle House conçu et réalisé au Danemark (Fig.4). Il s'agit du premier projet de logements sociaux au monde conçu selon le modèle de l'architecture circulaire. Sa construction a été achevée en 2020 et 90% de ses composants peuvent être réutilisés sans perdre de leur valeur.

⁴⁹ B.R.I.C: Build Reversible In Construction

⁵⁰ L'EFPP est un centre de formation en alternance situé dans la région bruxelloise. Ce centre comporte un pôle construction

⁵¹ Un matériau biosourcé est « un matériau issu du vivant, d'origine animale (ex. : laine de mouton), ou végétale (ex. : bois, paille) ». FFB. (2015). P5.

⁵² Les matériaux géosourcés sont des matériaux issus de ressources d'origine minérale tels que la terre crue ou la pierre sèche.

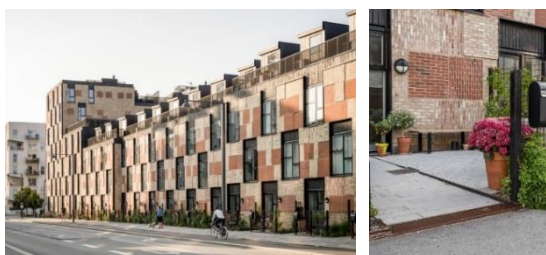


Fig. 3. Le projet The Resource Rows au Danemark
au Danemark

©<https://lendager.com/project/resource-rows/>



Fig. 4. Le projet Circle House

©Guldager Jensen, K. et al (2019)

3.1.3. Optimisation du stock bâti :

En plus des édifices à concevoir, le parc des bâtiments existants doit s'intégrer dans cette logique d'architecture circulaire. Rénover, réaffecter, récupérer et réutiliser sont des principes importants de l'architecture circulaire. Afin d'illustrer ces propos, nous allons nous baser sur des exemples tirés de la France et de la Belgique.

En France, le processus de l'architecture circulaire est tout à son début. Il y a quelques tentatives élaborées par la firme Bellastock⁵³. Cette entreprise a participé à la rénovation de la tour Montparnasse à Paris (Fig.5). Louis Destombes, architecte et coordinateur des projets chez Bellastock, explique que lors de cette opération de rénovation, les études ont commencé par un diagnostic au niveau du bâtiment pour déterminer les matériaux qui peuvent être réemployés dans une démarche circulaire. Environ 70% des 40 000 m² de vitrage serviront à l'agencement de parois intérieures, une grande partie du reste sera changée en remblai.

En Belgique, le secteur de l'architecture circulaire est plus structuré qu'en France. Rotor, un collectif bruxellois de recherche, conception et construction spécialisé en réalisation des matériaux, a créé la plateforme Opalis. Il s'agit d'une plateforme qui permet de répertorier les entreprises actives dans le domaine de l'économie circulaire, ainsi que les matériaux disponibles. Un des projets belges illustrant la démarche de l'architecture et de l'économie circulaires est la rénovation des façades de l'Institut Botanique de l'Université de Liège (Fig.6). « Ces façades ont été refaites en 2018 dans le contexte d'une rénovation énergétique. Leur béton d'origine trop altéré pour être restauré, a été recouvert de bois récupéré dont l'aspect rappelle les traces des anciens coffrages. 2740 m² de bois provenant de sources externes au chantier ainsi que 400 m² de bardage métallique de toiture et 120 m² de dalles de béton issues de la déconstruction in situ ont été réutilisés. »⁵⁴

⁵³ Bellastock est une société coopérative d'architecture d'intérêt collectif engagée dans l'architecture écologique et l'économie circulaire.

⁵⁴VENNE, J.F. La circularité se met en place. In Esquisses, Vers une architecture circulaire, printemps. Vol.33. n°1. (2022). P23.



Fig. 5. 3D de la rénovation de la tour Montparnasse à Paris de



Fig. 6. Rénovation de l'Institut botanique de l'université de Liège

© <http://parisfutur.com/projets/la-nouvelle-tour-montparnasse/>
© <https://opalis.eu/fr/projets/linstitut-de-botanique-de-lulg>

3.1.4. Déconstruire au lieu de démolir :

Certes il est plus facile et moins coûteux aujourd'hui de démolir un bâtiment que de le déconstruire. Faire table rase est toujours une solution de facilité. Cependant, cette solution de facilité qui est la démolition d'un bâtiment existant induit une augmentation des déchets de construction (DDC) et a un fort impact environnemental.

L'architecture circulaire adopte le principe de la déconstruction que ce soit pour les bâtiments désaffectés existants ou dès la phase de conception. En effet, dans le premier cas, les bâtiments désaffectés et abandonnés sont considérés comme des "mines de matériaux" pour les projets à concevoir. L'opération se fait par la dépose et le tri sélectif des matériaux sur chantier. La constitution d'un passeport matériau est nécessaire pour avoir toutes les données techniques et garanties concernant la qualité du matériau destiné au réemploi.

Dans le deuxième cas qui correspond à la phase de conception, la déconstruction du bâtiment est un critère qui sera tenu en considération et réfléchi dès cette phase. Au milieu du XX^{ème} siècle, l'architecte français Jean Prouvé⁵⁵ appelait ce concept " l'anticipation de la déconstruction". Cette méthode de conception a été nommée par les anglophones par *design for deconstruction* ou *design for disassembly* (DFD)⁵⁶.

3.1.5. Préservation des ressources naturelles et économie d'énergie :

L'architecture circulaire est l'architecture de l'économie et du non-gaspillage. L'économie des matériaux en prolongeant leur utilisation par le réemploi, la réutilisation et le recyclage, mais également l'économie de l'eau et de l'énergie. Manuel R. Cisneros, architecte responsable de l'écoconception chez Sid Lee Architecture à Montréal explique ce principe de l'architecture circulaire comme suit : « *En plus des matériaux, il faut réfléchir à la gestion de l'énergie et de l'eau, Faire en sorte d'en utiliser*

⁵⁵ "Considérant qu'il n'y a pas de différence entre la construction d'un meuble et d'un immeuble, Jean Prouvé développe une « pensée constructive » basée sur une logique de fabrication et de fonctionnalité qui génère une esthétique épurée de tout artifice. Appliquant les mêmes principes à la production de mobilier et à l'architecture, les structures, produites en petites séries dès les années 30, sont assemblées et articulées par des mécanismes astucieux, permettant aux meubles comme aux bâtiments d'être aisément modifiés, démontés, déplacés." <https://www.patrickseguin.com/fr/designers/jean-prouve-architecte/inventaire-maison-jean-prouve/> consulté le 28/03/2023. A côté du mobilier, Jean prouvé a conçu et construit plusieurs maisons démontables témoignant de son ingéniosité.

⁵⁶ Rubin, P et al. (2017). P11.

le moins possible et d'en perdre le moins possible, en créant des boucles d'échanges [d'énergie, d'eau et de matériaux], soit à l'intérieur du projet ou à plus grande échelle »⁵⁷.

3.2 L'architecture circulaire dans le contexte tunisien

Nous avons effectué une enquête auprès des architectes tunisiens. Cette enquête est basée sur un questionnaire adressé aux concepteurs via les réseaux sociaux. Nous présenterons dans cet article les résultats préliminaires de ce travail exploratoire mené dans le but d'avoir un *feed-back* de la sphère professionnelle tunisienne à propos de l'applicabilité de l'architecture circulaire.

3.1.1. Caractérisation de l'échantillon :

Après plusieurs requêtes, nous avons eu la réponse de 53 participants. 63.5% des questionnés sont des femmes et 36.5% sont des hommes.

13% des participants ont entre 30 et 40 ans, 81% ont entre 40 et 60 ans, 6% ont plus que 60 ans.

67% des questionnés exercent dans le secteur privé et 33% dans le secteur public. Les architectes questionnés sont répartis en trois catégories :

- 16% sont des architectes de l'administration (ministères, INP⁵⁸, municipalités),
- 23% sont des enseignants chercheurs,
- 61% sont des architectes exerçant dans le secteur privé.

3.2.2. Résultats de l'enquête :

En posant la question sur la contribution des architectes à la conception d'un espace architectural durable, les réponses s'articulent autour de l'intégration du projet dans le site, le choix d'une bonne orientation, l'utilisation de matériaux locaux, l'économie d'énergie et la récupération des eaux pluviales.

Concernant la connaissance du concept de « l'architecture circulaire », seulement 45% des architectes questionnés confirment qu'ils ont en déjà entendu parler. Parmi eux, 16% sont des enseignants chercheurs, 8% sont des architectes de l'administration et 21% exercent dans le secteur privé.

En répondant à la question relative à la définition de l'architecture circulaire, 15% des questionnés la définissent en tant qu'une architecture consciente de son contexte économique et environnemental. 31% la définissent en tant qu'une architecture flexible et réversible et 19% associent ces deux définitions.

En interrogeant les concepteurs à propos de l'économie circulaire dans le secteur du bâtiment en Tunisie, environ 96% d'entre eux pensent que cette dernière devrait être promue dans le secteur du bâtiment ; toutefois, l'économie circulaire n'est pas actuellement envisagée dans la conception architecturale en Tunisie.

Lors de la conception des projets architecturaux, 42.3% des concepteurs questionnés n'utilisent aucun principe de l'architecture circulaire notamment la flexibilité et la réversibilité de l'usage, le

⁵⁷ Ordre des Architectes du Québec. Vers une architecture circulaire.Vol.33 n°1. (2022). P28. En ligne : <https://www.oaq.com/magazine-esquisses/archives/vers-une-architecture-circulaire/>.

⁵⁸ INP : Institut National du Patrimoine.

recours aux matériaux issus du réemploi et du recyclage, la conception pour la déconstruction (*design for deconstruction DFD*), le choix de matériaux à faible empreinte carbone et le choix de matériaux écologiques.

En questionnant les concepteurs sur la possibilité de concevoir actuellement une architecture circulaire en Tunisie, uniquement 38% d'entre eux ont répondu positivement. Ceci serait possible par l'utilisation de matériaux issus du recyclage et du réemploi, la promotion des matériaux locaux et la promulgation des lois nécessaires pour structurer le secteur.

Pour réussir à concevoir une architecture circulaire, environ 35% des concepteurs pensent qu'il faut créer des plateformes pour la traçabilité des matériaux issus des chantiers de démolition, revoir la réglementation afin de promulguer des textes législatifs en faveur des matériaux de réemploi et veiller à créer des matériaux labellisés.

Pour promouvoir l'architecture circulaire en Tunisie, les concepteurs proposent d'encourager l'emploi « des matériaux de cueillette et d'élaborer des cahiers de charge de bonnes pratiques ». Ils recommandent également la création de l'industrie du recyclage des matériaux de construction et la sensibilisation des différents acteurs de l'acte du bâti. Ils pensent aussi que l'État doit jouer un rôle important dans la médiatisation de ce nouveau concept et la réalisation des projets pilotes.

Concernant les contraintes pour l'applicabilité de l'économie circulaire dans le secteur de construction en Tunisie, 31% des questionnés pensent que les contraintes majeures résident essentiellement dans l'Inconscience environnementale des acteurs du secteur du bâtiment, l'absence de données concernant les matériaux de construction recyclés sur le marché tunisien, le surcoût des travaux de démontage et de tri des matériaux au niveau du chantier en vue de leur réemploi et l'absence de coordination entre les différents acteurs du bâtiment.

Selon les concepteurs questionnés, les autres freins qui bloquent l'applicabilité de l'économie circulaire dans le domaine du bâtiment en Tunisie sont principalement l'absence des start-ups valorisant ce concept, l'inexistence de nouveaux matériaux biosourcés sur le marché tunisien, le manque de visibilité dans les stratégies actuelles de l'Etat et l'absence de plateformes spécialisés dans les matériaux de réemploi et de recyclage.

Environ 85% des concepteurs confirment qu'il n'existe pas sur le marché tunisien des matériaux recyclés auxquels ils avaient eu recours dans leurs conceptions architecturales. Ils présentent une liste de matériaux qui peuvent être recyclés et réutilisés tels que le bois, le verre, le pvc, la pierre, tous types de gravats, les déchets de construction et la paille.

4 Discussion

Le concept de l'architecture circulaire est intimement lié au développement durable. En effet, concevoir l'architecture selon le modèle circulaire signifie : travailler sur la réversibilité fonctionnelle et structurelle en dissociant les différentes strates du projet, utiliser des matériaux circulaires à faible impact carbone, optimiser le stock des bâtiments bâtis en prolongeant leur durée de vie, favoriser la déconstruction plutôt que la démolition des bâtiments existants, "anticiper la déconstruction" dès la phase conceptuelle, préserver les ressources naturelles et économiser l'énergie.

Tous ces principes de l'architecture circulaire que nous venons d'évoquer sont en totale concordance avec le concept du développement durable.

Concernant l'architecture circulaire en Tunisie, l'enquête préliminaire menée auprès des concepteurs nous a permis de contextualiser notre thématique de recherche. Les résultats ont démontré que l'architecture circulaire et ses principes restent relativement méconnus de la part de la ma-

jeunesse de la sphère professionnelle tunisienne. La connaissance de ce concept est limitée aux enseignants chercheurs, certains architectes qui travaillent dans les ministères et à quelques architectes professionnels exerçant dans le secteur privé au sein d'enseignes internationales.

Le développement durable est un concept plus démocratisé actuellement en Tunisie que l'architecture circulaire. Il se résume dans la pratique de la sphère professionnelle tunisienne par l'intégration du projet au site, le choix d'une bonne orientation, l'utilisation des matériaux locaux, l'économie de l'énergie et des ressources (par la récupération des eaux pluviales).

Quant à l'économie circulaire en rapport avec le secteur de la construction, elle est tout à ses débuts en Tunisie et se résume dans un seul projet pilote (RE-MED) dont le programme est limité actuellement au recyclage des déchets de construction et de démolition. Ces déchets seront transformés en matériaux servant à la construction des routes.

La plupart des architectes toutes catégories confondues, confirment que l'économie circulaire n'est pas actuellement envisagée dans la conception. Ils sont également conscients de l'importance de sa promotion dans le secteur du bâtiment.

La majorité des architectes confirment qu'il n'est pas possible dans les conditions actuelles de concevoir une architecture circulaire en Tunisie.

Pour promouvoir l'architecture circulaire en Tunisie, les concepteurs proposent de :

- Promulguer de nouvelles lois en la matière afin de structurer le champ du réemploi,
- Encourager l'industrie du recyclage,
- Favoriser les matériaux locaux et non polluants,
- Créer des plates formes pour la traçabilité et la gestion des matériaux du réemploi tout en précisant leurs caractéristiques techniques,
- Labelliser et certifier les matériaux issus du réemploi et du recyclage pour garantir leur qualité
- Développer des cahiers des charges de bonnes pratiques
- Médiatiser le concept de l'architecture circulaire

La transposition de l'architecture circulaire en Tunisie serait donc possible avec des conditions bien précises touchant tous les volets (réglementaire, procédural, technique...) que nous venons d'évoquer. Ces conditions doivent être corrélées avec la préparation de l'infrastructure nécessaire pour la faire et la sensibilisation de tous les intervenants dans l'acte de bâtir. Une enquête plus élargie à propos de l'architecture circulaire englobant tous les professionnels de la construction est à envisager ultérieurement, afin de produire un cahier de charge avec des propositions favorisant l'applicabilité de ce nouveau concept dans le contexte tunisien.

5 Conclusion

L'architecture circulaire œuvre à l'image de la nature. Dans cette dernière, il n'y a pas la notion de déchets. L'architecture circulaire est l'architecture du réemploi, de l'économie des ressources, des matériaux et de l'énergie.

En Tunisie, un bâtiment en fin de vie ou bien il est réaffecté dans le cas idéal ou bien complètement démolit. Les concepteurs et les promoteurs sont obligés d'œuvrer selon un modèle plutôt linéaire de l'architecture à cause de contraintes réglementaires et techniques (des lois figées, inexistence de plates formes qui permettent de promouvoir les matériaux du réemploi et du recyclage, l'industrie du recyclage des matériaux de construction est tout à son début, l'existence d'une grande faille et la faible collaboration entre les chercheurs scientifiques, les professionnels du métier et le monde entrepreneurial....).

Certes, il y a un souci de la part des concepteurs tunisiens de concevoir des bâtiments durables, mais, ce souci est beaucoup plus orienté vers une économie de l'énergie et vers l'intégration de procédés techniques pour le faire.

Pour construire, il est plus facile et plus rapide de démolir que de déconstruire, trier et réemployer. La première démarche linéaire génère un grand taux de déchets et la seconde circulaire récupère et revalorise ce qui est démonté. D'ailleurs, notre patrimoine architectural remontant à l'époque romaine et médiévale témoigne de cette attitude de réemployer des matériaux déjà existants. Économiser les ressources et les matériaux par un réemploi et une réutilisation de ce qui existe, diminuer l'empreinte carbone de l'acte de bâtir et les gaz à effet de serre, éviter le gaspillage, concevoir des bâtiments flexibles et indépendants de leur fonctionnalité, travailler avec les moyens et les matériaux locaux sont des principes de l'architecture circulaire et un créneau que nous devons intégrer afin d'atteindre la durabilité de la production architecturale et urbaine.

Sensibiliser les concepteurs à cette démarche est un acte plus que nécessaire à notre avis. Une sensibilisation qui passe tout d'abord par l'école et qui vise les étudiants futurs architectes, mais également une sensibilisation de la sphère professionnelle tunisienne qui œuvre sur terrain.

Il faut également que le cadre législatif suive et qu'il y ait une vraie volonté de la part de l'état d'agir. Les principes de l'architecture circulaire devraient être intégrés en tant que critères de sélection lors des concours d'architecture. Ajoutons à cela qu'il serait souhaitable de créer des procédures pour encourager les promoteurs à faire des diagnostics de ce qui est récupérable au niveau des bâtiments et des chantiers.

Il est recommandé d'une part de structurer la filière du réemploi des matériaux de déconstruction issus du BTP⁵⁹ en créant des plateformes spécialisées et en faisant intervenir tous les acteurs de l'acte de bâtir, et d'autre part, d'encourager la recherche scientifique dans le domaine des matériaux biosourcés locaux ainsi que la collaboration entre le domaine de la recherche et l'entrepreneuriat.

Enfin, nous pensons que l'architecture circulaire incite l'ingéniosité et sollicite la créativité des concepteurs et des différents acteurs de l'acte de bâtir. Pour réussir une conception architecturale circulaire, il faut penser dès le départ à son futur et à sa déconstruction, en réfléchissant à sa réversibilité et en séparant dans la mesure du possible les différentes strates qui la composent.

Remerciement

Nous remercions nos collègues architectes d'avoir accepté de participer à notre enquête sur l'architecture circulaire en Tunisie.

Références

1. Bégnier, G. architecture et économie, ce que l'économie circulaire fait à l'architecture. Eyrolles, Paris (2018).
2. Brand, S. How buildings learn: what happens after they're built. Penguin (1995).
3. Dautremont, C et al. Le BIM6D comme levier pour une architecture circulaire. In SHS Web of Conferences. vol. 47 (2018). En ligne: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701005>.
4. European commission. Circular Economy – Principles for Building Design. (2020) 30p, En ligne: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/39984>.

⁵⁹ BTP : Bâtiments et travaux publics.

5. Fénard, G. Conception circulaire et réemploi en architecture, expertises et acteurs : le rôle du valoriste. Mémoire de mastère en Architecture (2020). Université de Liège. En ligne : <http://hdl.handle.net/2268.2/12556>.
6. Fersi, C et al. Circular economy in Tunisia. In Kumar Gosh, S. et Kumar Gosh, S. (ed). Circular economy: recent trends in global perspective. (2021). PP. 113-144. En ligne : DOI : 10.1007/978-981-16-0913-8_4. Consulté le 19/10/2023.
7. FFB. Les matériaux biosourcés dans le bâtiment, Guide de la Fédération Française du Bâtiment (2015) /147, 23p. En ligne : <https://www.batirpourlaplanete.fr/definition/materiau-biosource/>
8. GIZ. Rapport sur la gestion des déchets solides en Tunisie. (2014). En ligne : <http://www.collectiviteslocales.gov.tn/wp-content/uploads/2019/04/rapportsweepnet.pdf>.
9. Guillemeau, J-M et al. Guide pratique sur réemploi et réutilisation pratiques des matériaux de construction (2013).
10. Guldager Jensen, K. et al. Building a circular future. 3rd edition. KLS PurePrint (2019).
11. Laboratoire de Génie Civil. Energie et Matériaux en Génie Civil. En ligne : http://www.equipement.tn/fileadmin/user_upload/semi14.pdf.
12. MALE. Conception et implémentation d'un système de gestion intégrée des déchets de construction et de démolition en Tunisie, phase 1 : diagnostic approfondi de l'état de la gestion actuelle des déchets de construction et de démolition en Tunisie. (2020). En ligne sur: <http://www.collectiviteslocales.gov.tn/>.
13. MEADOWS D. et al, The limits to growth. Universe books. (1972).
14. Ministère des Affaires Locales et de l'Environnement. Conception et implémentation d'un système de gestion intégrée des déchets de construction et de démolition, Phase 1 : Diagnostic approfondi de l'état de la gestion actuelle des déchets de construction et de démolition en Tunisie. (2021).
15. Ordre des Architectes du Québec. Vers une architecture circulaire. Vol.33 n°1. 54p (2022). En ligne : <https://www.oaq.com/magazine-esquisses/archives/vers-une-architecture-circulaire/>.
16. Orée. Comment mieux déconstruire et valoriser les déchets du BTP. (2018). En ligne : <https://www.union-habitat.org/sites/default/files/articles/pdf/>.
17. Rubin, P et al. Construire réversible. In Canal Architecture. (2017). En ligne : https://canal-architecture.com/wp-content/uploads/2021/04/2017.04_Construire_Reversible.pdf.
18. <https://c2ccertified.org/>. Consulté le 15/03/2023.
19. <https://www.bamb2020.eu/>. Consulté le 15/03/2023.
20. <https://www.batirpourlaplanete.fr/definition/materiau-biosource/>. Consulté le 18/03/2023.
21. <https://lendager.com/project/resource-rows/>. Consulté le 20/03/2023.
22. <http://parisfutur.com/projets/la-nouvelle-tour-montparnasse/>. Consulté le 25/03/2023.
23. <https://opalis.eu/fr/projets/linstitut-de-botanique-de-lulg>. Consulté le 25/03/2023.
24. https://ue-tunisie.org/projet-192-10-413_application-de-l-innovation-pour-le-developpement-de-lecono.html. Consulté le 16/03/2023
25. <https://www.patrickseguin.com/fr/designers/jean-prouve-architecte/inventaire-maison-jean-prouve/>. Consulté le 28/03/2023
26. <https://www.circubuild.be/fr/faq/qu-entend-on-par-stratification-en-lien-avec-la-construction-circulaire/>. Consulté le 29/03/2023
27. <https://www.ecologiehumaine.eu/architecture-et-economie-ce-que-leconomie-circulaire-fait-a-larchitecture-podcast/>. Consulté le 18/10/2023.
28. <https://switchmed.eu/fr/>. Consulté le 19/10/2023.
29. <https://switchmed.eu/wp-content/uploads/2020/12/2020.12.18-Country-Profile-Tunisie.pdf>

RETOUR SUR LE PANEL DE DISCUSSION

Un panel de discussion ouvert à tous les intervenants et invités a permis de clôturer le colloque. Il fût l'occasion de partager les expériences des différents participants.

Les représentants de l'Agence Urbaine du Grand Tunis ont pu partager l'initiative dans l'agence dans l'objectif d'établir un bilan carbone territorial de Grand Tunis, en collaboration avec la société Greenway et l'appui de l'université de Manouba. Une plateforme en cours d'élaboration comporterait une cartographie climatique et des données par découpage sectoriel. La plateforme serait un outil de mesure et d'accompagnement permettant de localiser les zones les plus vulnérables et assurant une planification et un aménagement urbain durable de la région. L'expérience sur laquelle travaille l'agence implique trois communes différentes : Sidi Thabet, Soukra et Ben Arous.

Le fondateur de la société SOIB, a partagé avec l'audience son expérience dans une société pionnière de fabrication de matériaux de construction durables. Il a présenté les briques de terres stabilisées que la société fabrique comme une solution locale adaptée au contexte tunisien. Il a également insisté sur l'importance de la transition durable qui permettrait de garantir une meilleure qualité de vie tant dans les espaces extérieurs qu'intérieurs. Il a suggéré de récompenser les projets et les recherches les plus innovantes afin d'encourager les démarches durables.

La société civile et les organisations non gouvernementales ont été fortement représentées notamment par le projet « Resilient Cities » lancé par l'association « Tunisien Youth Impact » qui vise à établir une justice climatique dans les villes Tunisiennes les plus vulnérables à travers l'implication des communautés marginalisées. La coordinatrice du programme a insisté sur l'importance de la décentralisation afin de faire profiter les régions de l'intérieur des projets et des perspectives de transition. La représentante de UN-Habitat a, quant à elle, mis l'accent sur l'importance des potagers urbains dans la préservation de la sécurité alimentaire, dans la perspective de ville courte-distance et dans l'objectif d'éliminer la parité entre ville et campagne. Elle a partagé l'expérience du jardin potager du Belvédère lancé par UN-Habitat en partenariat avec la Municipalité de Tunis, dans le jardin des plantes au Parc du Belvédère ainsi que les nombreuses campagnes de sensibilisation.

Plusieurs chercheurs et enseignants présents ont mis l'accent sur l'important rôle de l'enseignement et de la recherche dans les stratégies d'adaptation.

Finalement, la fondatrice et directrice générale de la revue Archibat, a insisté sur l'urgence d'une collaboration entre les chercheurs et les organismes institutionnels essentiellement sur les projets de régénération des centres anciens qui constituent un axe important dans la transition vers des villes durables et que travailler sur l'intelligence collective et les collaborations internationales est devenu une nécessité.

Nombreuses ont été les idées soulevées qui n'ont fait qu'enrichir le dialogue par de nombreuses suggestions et remarques. Ce fût donc un moment d'échange fructueux autour des problématiques d'actualité étroitement liées au changement climatique et aux stratégies d'adaptation dans les villes.