

التقنيات الخضراء والبصمة الكربونية: نحو اقتصاد مستدام وتحقيق الحياد الكربوني بحلول

2050 _ إشارة إلى الجزائر _

Green Technologies and Carbon Footprint :towards a Sustainable Economy
and achieving Carbon Neutrality by 2050 _the case of Algeria_

خطوف سعاد

جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة، مخبر ECOFIMA، s.khattouf@univ-skikda.dz

تاريخ القبول: 2025/11/24

تاريخ الاستلام: 2025/09/23

ملخص:

يشكل تغير المناخ الناتج عن ارتفاع الانبعاثات الكربونية أحد أبرز التحديات البيئية والاقتصادية عالميًا، مما يستدعي تبني حلول مبتكرة للحد من هذه الظاهرة. وتبرز التقنيات الخضراء كخيار استراتيجي يساهم في تقليص الاعتماد على الوقود الأحفوري وخفض الانبعاثات، بينما تُعد البصمة الكربونية أداة مركزية لقياس حجم هذه الانبعاثات وتقييم جهود الأفراد والمؤسسات والدول في مسار الاستدامة. يهدف هذا البحث إلى دراسة دور التقنيات الخضراء في الحد من البصمة الكربونية، مع التركيز على موقع الجزائر في هذا المسار وأفاقها نحو الحياد الكربوني بحلول عام 2050. اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي من خلال مراجعة الأدبيات والتجارب الدولية إضافة إلى التجربة الجزائرية في مشروع عين صالح. خلصت النتائج إلى أن الجزائر تملك إمكانيات هائلة لتطوير الاقتصاد الأخضر، غير أن تحديات التمويل ونقل التكنولوجيا تبقى عائقًا، ما يستلزم تبني استراتيجيات أكثر فاعلية لتحقيق أهداف التنمية المستدامة.

كلمات مفتاحية: التقنيات الخضراء، البصمة الكربونية، التنمية المستدامة، الاقتصاد الأخضر.

تصنيف JEL: Q56، Q01، Q54، Q20.

Abstract :

global environmental and economic challenges, requiring innovative solutions to mitigate its impacts. Green technologies emerge as a strategic option to reduce reliance on fossil fuels and curb emissions, while the carbon footprint serves as a central tool for measuring these emissions and assessing the efforts of individuals, institutions, and states in the path toward sustainability. This paper aims to examine the role of green technologies in reducing the carbon footprint, with a particular focus on Algeria's position in this trajectory and its prospects for achieving carbon neutrality by 2050. The study adopts a descriptive-analytical approach through a review of literature and international experiences in Green technologies, in addition to Algeria's case in the In Salah project. The findings reveal that Algeria possesses significant potential to develop a green economy; however, challenges related to financing and technology transfer remain, necessitating more effective strategies to meet sustainable development goals

Keywords : Green technologies, carbon footprint, sustainable development, Green Economy.

Jel Classification Codes : Q20, Q54, Q01, Q56.

1. مقدمة

يشهد العالم في العقود الأخيرة تحديات بيئية متنامية نتيجة تزايد الانبعاثات الغازية وعلى رأسها غاز ثاني أكسيد الكربون، الذي يُعد المساهم الأكبر في ظاهرة الاحتباس الحراري والتغيرات المناخية. وأمام هذه التحديات، برزت التقنيات الخضراء كخيار استراتيجي للحد من الآثار السلبية للنشاط البشري على البيئة، من خلال اعتماد حلول مبتكرة قائمة على الطاقات المتجددة، وكفاءة استخدام الموارد، وتطوير تقنيات صديقة للمحيط. وفي هذا السياق، برزت البصمة الكربونية كمؤشر أساسي لقياس حجم الانبعاثات وتقييم جهود الدول والمؤسسات والأفراد في مسار الانتقال الطاقوي والتحول نحو الاقتصاد الأخضر.

تكتسي دراسة العلاقة بين التقنيات الخضراء والبصمة الكربونية أهمية بالغة كونها ترتبط ارتباطاً مباشراً بمساعي تحقيق التنمية المستدامة، إذ تهدف هذه الأخيرة إلى الموازنة بين النمو الاقتصادي والحفاظ على البيئة وضمان رفاهية الأجيال الحالية والمقبلة. وقد أضى الحديث عن خفض البصمة الكربونية من خلال الاستثمار في الطاقة الشمسية، والهيدروجين الأخضر، والنقاط الكربون وتخزينه، إضافة إلى تعزيز كفاءة المباني والبنى التحتية، جزءاً لا يتجزأ من السياسات البيئية والاقتصادية العالمية.

أما في الجزائر، فقد أدركت الدولة مبكراً ضرورة الانخراط في هذا التوجه العالمي، حيث تبنت استراتيجيات للتحويل الطاقوي تقوم على توسيع استغلال الطاقات المتجددة مثل الطاقة الشمسية و طاقة الرياح، وتجربة مشاريع رائدة على غرار مشروع احتجاز وتخزين الكربون في عين صالح، إضافة إلى إطلاق برامج للتشجير وتقليص الانبعاثات. ورغم التحديات المرتبطة بتمويل هذه المشاريع وتوطين التكنولوجيا، إلا أن الجزائر تملك إمكانيات معتبرة تجعلها قادرة على لعب دور محوري في مسار الانتقال نحو الاقتصاد الأخضر.

من هنا تنبثق إشكالية هذا البحث في التساؤل حول: إلى أي مدى يمكن أن تسهم التقنيات الخضراء في خفض البصمة الكربونية، وما هو موقع الجزائر في هذا المسار ضمن آفاق التنمية المستدامة والحياد الكربوني 2050؟

للإجابة عن الإشكالية الرئيسية نطرح الفرضيات التالية:

- التقنيات الخضراء تمثل أداة إستراتيجية لتقليل الانبعاثات وتحقيق التنمية المستدامة؛
- اعتماد الجزائر على تقنيات احتجاز الكربون في مشروع عين صالح يعكس توجهها نحو خفض البصمة الكربونية كخطوة أولية في مسار تحقيق الحياد الكربوني بحلول منتصف القرن؛
- يمكن أن يشكل تطوير مشاريع مماثلة لمشروع عين صالح بالتوازي مع الاستثمار في الطاقات المتجددة، مسارا متكاملا يمكن الجزائر من تحسين موقعها في مؤشرات الاستدامة والحياد الكربوني عالميا.

ويهدف هذا العمل إلى:

1. توضيح مفهوم البصمة الكربونية وأهمية قياسها.
2. استعراض أبرز التقنيات الخضراء ودورها في خفض الانبعاثات.
3. إبراز مكانة الجزائر وتجاربها في مجال التقنيات الخضراء والحد من البصمة الكربونية.
4. استشراف الآفاق المستقبلية لتحقيق التنمية المستدامة والحياد الكربوني

المنهج المستخدم: تم الاعتماد على المنهج الوصفي التحليلي مع توظيف البيانات الإحصائية الرسمية الصادرة عن وزارة الانتقال الطاقوي والطاقات المتجددة، والمركز الوطني للبحث في البيئة والتنمية المستدامة. إضافة إلى تقارير البنك العالمي والأمم المتحدة فضلا عن وكالة الطاقة الدولية.

2. الإطار النظري للتقنيات الخضراء والبصمة الكربونية

1.2 التقنيات الخضراء

تشمل التقنيات الخضراء مختلف العمليات والمنتجات الابتكارية التي تستخدم بأسلوب يحافظ على الموارد الطبيعية والبيئة، والتي تسمح بالتقليل من كمية النفايات والتلوث الناجم عن عمليات الإنتاج والاستهلاك. ويمكن تعريفها على أنها أي منتج أو عملية تساهم في التقليل من الآثار السلبية على البيئة (صيفي، 2020، صفحة 09) من خلال الاستخدام المستدام للموارد أو تحقيق كفاءة أعلى، أو تعزيز إعادة الاستخدام والتدوير، أو خفض الانبعاثات والتلوث.

مما سبق نخلص إلى أن التقنيات الخضراء هي التكنولوجيات التي تهدف إلى تطبيق الإدارة المستدامة من خلال الاستخدام الأمثل للموارد الطبيعية والبيئية، بما يلبي احتياجات الحاضر دون المساس بقدرة الأجيال القادمة على تلبية احتياجاتهم.

تشمل التقنيات الخضراء مجموعة من التكنولوجيات التي تهدف إلى الحياد الكربوني وتقليل الأضرار البيئية على جميع الأصعدة من بينها:

الكيمياء الخضراء وتعني التخلص من استخدام وإنتاج المواد الكيميائية الضارة للبيئة والصحة البشرية، وذلك عن طريق إيجاد وتخطيط الأساليب التي تمنع إنتاج هذه المواد، وتعتبر الكيمياء الخضراء نهجا مبنيا على تصميم العمليات الكيميائية والمنتجات الكيميائية الآمنة للبيئة تهدف إلى تحقيق الاستدامة من خلال استخدام مصادر الطاقة المتجددة (الزغول، 2023، صفحة 709)

الطاقة الخضراء: هي أي شكل من أشكال الطاقة من المصادر الشمسية والجيوفيزيائية والأحيائية التي تجدد تلقائيا بفعل الطبيعة بوتيرة تساوي أو تفوق وتيرة نضوبها. ويحصل على الطاقة المتجددة من تيارات الطاقة المستمرة والمتكررة الموجودة في البيئة الطبيعية، وتضم التكنولوجيات ذات الحمولة القليلة من الكربون كالطاقة الشمسية، والطاقة المائية وطاقة الرياح وطاقة المد والجزر، إضافة إلى الطاقة الحرارية الأرضية فضلا عن طاقة الكتلة الأحيائية (الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، 2011، صفحة 166). وتعد الطاقة الشمسية هي الأكثر وفرة من بين جميع مصادر الطاقة، ويمكن حتى توليدها في الطقس الغائم. حيث يفوق معدل اعتراض الأرض للطاقة الشمسية بحوالي 10000 مرة معدل استهلاك البشر للطاقة، وتعمل الطاقة الشمسية على أشعة الشمس إلى طاقة كهربائية إما من خلال الألواح الكهروضوئية أو من خلال المرايا التي تركز على الإشعاع الشمسي، وإن لم تكن جميع البلدان تتمتع بالطاقة الشمسية على حد سواء فإن المساهمة الكبيرة في مزيج الطاقة من الطاقة الشمسية المباشرة ممكنة لكل بلد (الأمم المتحدة).

المباني الخضراء تعود نشأة فكرة المباني الخضراء إلى عام 1970 حيث ظهرت هذه الحركة في الولايات المتحدة، من الحاجة والرغبة في بناء أكثر كفاءة في استخدام الطاقة وممارسات صديقة للبيئة (حاجة، 2017، صفحة 181). ويعرف المبنى الأخضر على أنه المبنى الذي يراعي الاعتبارات البيئية في كل مرحلة من مراحل البناء، وهي التصميم، التنفيذ، التشغيل والصيانة، والاعتبارات الرئيسية التي تراعي تصميم الفراغات وكفاءة الطاقة والمياه، وكفاءة استخدام الموارد، وجودة البيئة الداخلية للمبنى وأثر المبنى ككل على البيئة. مما يسمح بتحقيق جودة هواء أفضل،

إضاءة طبيعية وفيرة، توافر إطلاالات، ومكافحة الضوضاء والتي تقيد شاغلي المبنى، مما يجعل هذه المباني مكان أفضل للعمل أو المعيشة (واكد، 2023).

تكنولوجيا النانو الخضراء: هو العلم الذي يهتم بدراسة معالجة المادة على المقياس الذري والجزيئي الذي يساهم في ابتكار تقنيات ووسائل جديدة تقاس أبعادها بالنانومتر وهو جزء من الألف من الميكرومتر، أي جزء من المليون من المليمتر، وعادة تتعامل هذه التقنية مع تجمعات ذرية تتراوح بين خمس ذرات إلى ألف ذرة وهي أبعاد البكتريا والخلية الحية (رواد أحمد كريم، 2019، صفحة 607). وقد نال علم النانو تكنولوجياي الأخضر اهتماما كبيرا على المستوى العالمي لما أحدثه من تغيرات جذرية في خواص المواد الفيزيائية والكيميائية والمغناطيسية والإلكترونية، ومن تطبيقاته التي تدفع بعجلة التنمية تخزين الطاقة وإنتاجها وتحويلها، تحسين الإنتاج الزراعي، معالجة مياه الشرب، تشخيص الأمراض ومتابعتها، تسليم الأدوية، معالجة الطعام وتخزينه، معالجة تلوث الهواء، البناء، مراقبة الصحة، مقاومة الآفات والحشرات (مرفت رشاد و أيمن جابر، 2017، صفحة 04). كما يمثل النانو الأخضر رافداً أساسياً لتحقيق التنمية المستدامة، حيث يتيح إنتاجاً أكثر كفاءة باستخدام كميات أقل من المواد والطاقة، مع تقليص الانبعاثات والنفايات إلى أدنى المستويات، وبالتالي تخفيف الأثر البيئي بشكل ملحوظ.

2.2 البصمة الكربونية: أثبتت تقارير البنك الدولي في العقود الأخيرة على أهمية المحافظة على البيئة كعمود أساسي للأجيال الصاعدة (بوحنيك و زارع، 2018، صفحة 16). وذلك من خلال خفض البصمة الكربونية والتي تعرف على أنها مؤشر يتم من خلاله التعبير عن كمية انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري المستخدم في إنتاج الطاقة الكهربائية، ووسائل النقل المختلفة والنشاطات الصناعية وغيرها. يعبر عنها بوحدة الطن من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في العام (محمد عبد الرحمن، 2023، صفحة 29). ويُعبر عنها عادة بالطن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون سنوياً. ويمكن النظر إليها باعتبارها مجموع الانبعاثات الصادرة عن فرد أو مؤسسة أو دولة نتيجة استهلاك الطاقة والاعتماد على مصادر النقل والأنشطة الاقتصادية المختلفة

يُقاس الأثر الكربوني من خلال تقدير الانبعاثات المرتبطة بكافة مراحل الإنتاج أو أنشطة الأفراد، مع مراعاة دورة الحياة الكاملة للمنتج ابتداءً من عملية التصنيع وحتى التخلص النهائي منه. ولأجل ذلك، طُورت مجموعة من الأدوات والبرامج المخصصة لتقدير البصمة الكربونية.

. أثر التقنيات الخضراء في خفض البصمة الكربونية نحو آفاق 2050

تُعتبر التقنيات الخضراء إحدى الركائز الأساسية في الحد من تداعيات التغير المناخي، من خلال خفض معدلات الانبعاثات وتعزيز الصحة العامة وحماية الموارد الطبيعية. كما تساهم هذه التقنيات في تحقيق أهداف التنمية المستدامة 2030 عبر ترشيد استهلاك الطاقة ودعم النمو الاقتصادي وتطوير الصناعات الصديقة للبيئة، فضلاً عن تعزيز القدرات الوطنية في مجال الابتكار ورفع التنافسية عالمياً. ويُتوقع أن يقود التوسع في هذه التطبيقات إلى انتقال تدريجي نحو الاقتصاد الأخضر القائم على الاستدامة (مركز الأهرام للدراسات السياسية والاستراتيجية، 2022). ومن أبرز الحلول التكنولوجية المرتبطة بالحياد الكربوني بحلول عام 2050 ما يلي:

1.3 الهيدروجين الأخضر منخفض التكلفة

بالرغم من أن الهيدروجين الأخضر هو أصغر جزيء في الكون، فإنه يتمتع بإمكانيات هائلة بوصفه وقوداً نظيفاً يمكن استخدامه في إحداث تحول الطاقة العالمي. ويعتبر الهيدروجين الأخضر خياراً مطروحاً ليصبح التوجه السائد بحلول عام 2030، ومن المتوقع أن تشهد السنوات القادمة تنفيذ إجراءات ملموسة لتطوير سوقه العالمي وخفض تكاليف إنتاجه ومع تطوير معايير وضمانات المنشأ إلى جانب خطط الدعم التي تساهم بتغطية فجوة تكاليف الحلول الخضراء، سيقدم الهيدروجين مساهمة مجدية في جهود العمل المناخي على المدى الطويل. ويصف مسار "آيرينا" لوقف ارتفاع درجات الحرارة عند 1,5 درجة مئوية، اعتماد النظم الكهربائية وكفاءة الطاقة كمحركين أساسيين لتحول قطاع الطاقة مدعومين بمصادر الطاقة المتجددة، والهيدروجين الأخضر المستدام ويساهم هذا المسار بخفض نحو 37 جيجا طن من الانبعاثات السنوية من غاز ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2050 . (الوكالة الدولية للطاقة المتجددة IRENA، 2022، صفحة 08)

2.3 احتجاز الكربون وتخزينه

يشهد العالم ارتفاعا غير مسبوق في انبعاثات الغازات الدفيئة، وعلى رأسها ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري في الصناعة والطاقة والنقل. وللدخول من هذه الانبعاثات برزت تقنية احتجاز وتخزين الكربون كأحد الحلول الواعدة لتحقيق أهداف اتفاق باريس للمناخ، يتمثل الدور المحوري لهذه التقنية في دعم مسارات الانتقال نحو منظومات الطاقة النظيفة وبالتالي تمثل حلا فعالا لمعالجة انبعاثات خاصة في القطاعات التي يصعب تخفيض انبعاثاتها مثل صناعة الاسمنت والحديد والصلب، والبتروكيماويات.

يشير مفهوم احتجاز الكربون إلى مجموعة من العمليات التكنولوجية التي تهدف إلى جمع ثاني أكسيد الكربون من مصادر الانبعاث، مثل محطات توليد الطاقة المعتمدة على الوقود الأحفوري أو مصانع إنتاج الإيثانول، ثم ضغطه ونقله بغرض التخزين أو الاستخدام أو كلاهما معا. وتعد تقنية احتجاز الكربون وتخزينه (CCS) الأكثر شيوعا، حيث يتم جمع ثاني أكسيد الكربون ثم حقنه في التكوينات الجيولوجية العميقة لعزله بشكل دائم. أما تقنية احتجاز الكربون واستخدامه (CCUS) فتركز على الاستفادة من ثاني أكسيد الكربون في تطبيقات صناعية دون تخزينه، مثل إنتاج الوقود والأسمدة، في حين يمثل احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه مزيجا بين النهجين السابقين (center for international environmental law). تتضمن العملية ثلاثة مراحل رئيسية: (National Grid Group, 2024)

الاحتجاز : فصل CO₂ عن الغازات الأخرى الناتجة عن العمليات الصناعية أو محطات توليد الطاقة؛

النقل : transport : نقل CO₂ عبر أنابيب أو شاحنات أو سفن إلى موقع التخزين؛
التخزين : storage : حقن CO₂ في تكوينات جيولوجية عميقة مثل حقول النفط أو الغاز المستنفذة أو طبقات المياه المالحة.

يتمثل الدور الأساسي لهذه التقنية في تمكين إنتاج الهيدروجين منخفض الكربون بتكلفة اقتصادية مما يعزز جهود إزالة الكربون في قطاعات أخرى من منظومة الطاقة، بما في ذلك القطاع الصناعي والنقل البحري، كما توفر هته التقنية آلية لإزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي، بما يساهم في موازنة الانبعاثات التي يصعب أو يتعذر خفضها بالوسائل التقليدية (International Energy Agency).

3.3 الاندماج النووي والطاقة النووية السلمية

قامت المنظمة النووية بالتنسيق مع مؤسسة الإمارات للطاقة النووية وبدعم من الوكالة الدولية للطاقة الذرية، بإطلاق مبادرة "الطاقة النووية من أجل الحياد المناخي" خلال افتتاح المؤتمر النووي العالمي في العاصمة البريطانية لندن، حيث دعت المبادرة إلى تعاون غير مسبوق بين صناع القرار لزيادة القدرة الإنتاجية للطاقة النووية بثلاث أضعاف بهدف الوصول إلى الحياد المناخي بحلول عام 2050. توفر الطاقة النووية فرصة ذهبية لخفض البصمة الكربونية للاقتصاد بأكمله بطريقة فعالة ومجدية من حيث التكلفة، وذلك من خلال إنتاج طاقة وفيرة ونظيفة وبأسعار معقولة على مدار الساعة، وقد احتضنت دولة الإمارات في 2023 مؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ COP28، هدفت من خلاله إلى تسريع خفض البصمة الكربونية لشبكة الكهرباء باستخدام الطاقة النووية، وهو ما يعد نموذجاً لدول الأخرى الذين يسعون إلى خفض الانبعاثات الكربونية وضمان أمن الطاقة. وفي دولة الإمارات العربية المتحدة وحيث تتوفر أشعة الشمس وتقوم مصادر الطاقة المتجددة بدور رئيسي في مزيج الطاقة، حققت الطاقة النووية أكبر عملية خفض للبصمة الكربونية في تاريخ الدولة، من خلال محطة بركة للطاقة النووية، التي أصبحت أكبر مصدر منفرد للكهرباء الصديقة للبيئة في دولة الإمارات، والتي ستنتج 40 تيراواط سنوياً بمجرد تشغيلها بالكامل، مع الحد من أكثر من 22 مليون طن من الانبعاثات الكربونية، ويعد البرنامج النووي السلمي الإماراتي واحداً من أكثر المشاريع النووية الجديدة كفاءة من حيث التكلفة والجدول الزمني (مؤسسة الإمارات للطاقة النووية، 2023).

بهذا يتضح أن التوجه نحو تطبيق التقنيات الخضراء، سواء عبر الهيدروجين الأخضر أو احتجاز الكربون أو الطاقة النووية، يُمثل مساراً جوهرياً للوصول إلى الحياد الكربوني وتقليل البصمة الكربونية بحلول عام 2050، بما يضمن استدامة التنمية وحماية البيئة للأجيال المقبلة

4. موقع الجزائر في مسار التنمية المستدامة والحياد الكربوني 1.4 التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون على مستوى العالم

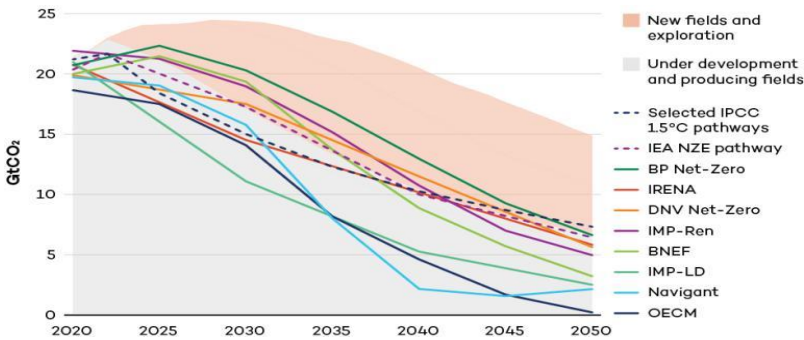
تشير نتائج الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ IPCC إلى أن تحقيق هدف الحد من الاحترار العالمي عند 1.5°م يستلزم خفض إنتاج النفط والغاز بنسبة تقارب 65% بحلول عام 2050. كما تكشف تحليلات المعهد الدولي للتنمية المستدامة IISD أن السيناريوهات الواقعية

التقنيات الخضراء والبصمة الكربونية: نحو اقتصاد مستدام وتحقيق الحياد الكربوني بحلول 2050 _ إشارة إلى
الجزائر _ سعاد خطوف

المعتمدة على مستويات ممكنة من تقنية احتجاز الكربون وفق تقرير IPCC، تقتضي خفض إنتاج النفط والغاز بنسبة 30% بحلول عام 2030 مقارنة بمستويات عام 2020 إلى جانب تقليص إنتاج الفحم بنحو 80% خلال العقد الحالي لضمان التوافق مع المسار المستهدف. وتدعم الوكالة الدولية للطاقة IEA هذه التوجهات من خلال سيناريو "صافي الانبعاثات الصفري". (International Institute for Sustainable Development, 2023) وهذا ما يوضحه

الشكل رقم 1

الشكل رقم 1: إنتاج النفط والغاز العالمي وفق مسارات مختارة لتحقيق هدف 1.5°م



المصدر: (International Institute for Sustainable Development, 2023)

على المستوى العالمي فإن أبرز الدول وأكثرها النقاطا للكربون لعام 2023 موضحة في الشكل رقم

2

الشكل رقم 2: أكثر الدول النقاطا للكربون في العالم خلال 2023



المصدر: (مجدي، 2024)

من خلال الشكل نجد أن الولايات المتحدة في الصدارة بنسبة 40.9% (22 مليون طن سنوياً)، مدعومة بتشريعات مثل خفض التضخم وبنية تحتية متقدمة؛ تليها البرازيل في المرتبة الثانية

بنسبة 19.3% (10.6 مليون طن)، ولتحتل كندا المرتبة الثالثة عالميا بنسبة 7.3% (4 ملايين طن) بخبرة رائدة وبمشروعات كبرى مثل "كويست" أما على المستوى العربي فكانت قطر تحتل المرتبة السادسة عالميا بقدرة 2.3 مليون طن مع خطط للوصول إلى 11 مليون طن بحلول 2035، تأتي بعدها السعودية بالمرتبة الثامنة (1.3 مليون طن) تستهدف 44 مليون طن بحلول 2030 بدعم من أرامكو ومركز الجبيل، لتتربع الجزائر في المرتبة التاسعة عالميا والثالثة عربيا بـ 1.2 مليون طن مع خطط توسع بالشراكة مع شركات دولية أبرزها "إيني" لتختتم روسيا بالمرتبة العاشرة بعد الجزائر (0.4 مليون طن) رغم مكانتها كمنتج رئيسي للوقود الأحفوري.

أما عام 2024 فقد شهد من خلال الشكل أدناه ارتفاعا ملحوظا في القدرة العالمية لاحتجاز الكربون واستعماله وتخزينه بنسبة 7.1% لتصل إلى 57.8 مليون طن مقارنة بـ 54 مليون طن في 2023، في وقت سجلت فيه انبعاثات قطاع الطاقة زيادة بنسبة 1% إلى مستوى قياسي بلغ 40.8 مليار طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون (رجب، أكبر الدول في قدرة احتجاز الكربون واستعماله وتخزينه دولتان عربيتان بالقائمة، 2025).

الشكل رقم 3: قدرة احتجاز الكربون واستعماله وتخزينه عالميا 2014-2024



المصدر: (رجب، أكبر الدول في قدرة احتجاز الكربون واستعماله وتخزينه دولتان عربيتان بالقائمة، 2025).

كما يوضح الشكل رقم 4 أن الولايات المتحدة تحافظ على الصدارة ضمن القائمة العالمية باستحواذها على 41.7% من إجمالي القدرة (24.1 مليون طن) تلتها البرازيل بـ 11.1 مليون طن ثم أستراليا بـ 5.7 مليون طن، بينما جاءت كندا والصين في المراتب الرابعة والخامسة على التوالي (4 و 3.6 مليون طن).

أما على المستوى العربي فقد حافظت كل من قطر والسعودية على نفس مراتبها مقارنة ب عام 2023 بقدرة 2.3 و1.4 مليون طن على التوالي في حين غابت الجزائر ما يعكس حداثة أسواق احتجاز الكربون عالميا وتفاوت مستويات الاستثمار فيه ، كما يمكن تفسيره أن الجزائر تركز تاريخيا على زيادة إنتاج وتصدير الغاز الطبيعي لتعزيز مواردها المالية، خاصة في ظل الطلب الأوروبي المتزايد بعد أزمة الطاقة، إضافة إلى أن تقنيات CCUS لا تزال تعتبر ثانوية مقارنة بأولوية تطوير البنية التحتية للغاز والنفط كما تحتاج إلى استثمارات ضخمة وتكنولوجيا متطورة، ورغم امتلاك الجزائر لاحتياطات مالية من المحروقات تواجه أولويات أخرى مثل البنية التحتية، التحول الطاقوي والتنمية الاجتماعية. لا ننسى كذلك أن في الجزائر لم يتبلور بعد إطار قانوني واضح أو برامج دعم قوية لجذب الاستثمارات الأجنبية في هذا المجال. فضلا عن تجربتها السابقة الرائدة فعلا (مشروع إن صالح لاحتجاز الكربون) والذي كان من أوائل المشاريع عالميا حيث أن توقف المشروع عام 2011 بسبب مشكلات تقنية وجيولوجية جعل الجزائر أكثر حذرا في إعادة خوض تجارب مماثلة.

الشكل رقم 4: أكبر الدول حسب قدرة احتجاز الكربون واستعماله وتخزينه عالميا خلال 2024



المصدر: (رجب، أكبر الدول في قدرة احتجاز الكربون واستعماله وتخزينه دولتان عربيتان بالقائمة، (2025).

2.4 التخزين الجيولوجي لثاني أكسيد الكربون في حقول الغاز والبتروال الجزائرية مشروع إن صالح:

تعد الجزائر مرشحة قوية لتطبيق CCS نظرا لامتلاكها احتياطات ضخمة من الحقول النفطية والغازية التي يمكن استخدامها للتخزين الجيولوجي، إضافة إلى امتلاكها خبرة تقنية في حقن الغاز

الطبيعي في إطار تعزيز إنتاج النفط EOR، فضلا على أنها مشاريع بحثية بالتعاون مع شركات
مثل سوناطراك و IEA

يقع مشروع عين صالح في جنوب الجزائر، في منطقة صحراوية نائية على بعد 1200
كيلومتر من العاصمة الجزائرية و 150 كيلومترا عن أقرب تجمع سكني كما هو موضح في الصورة
أدناه

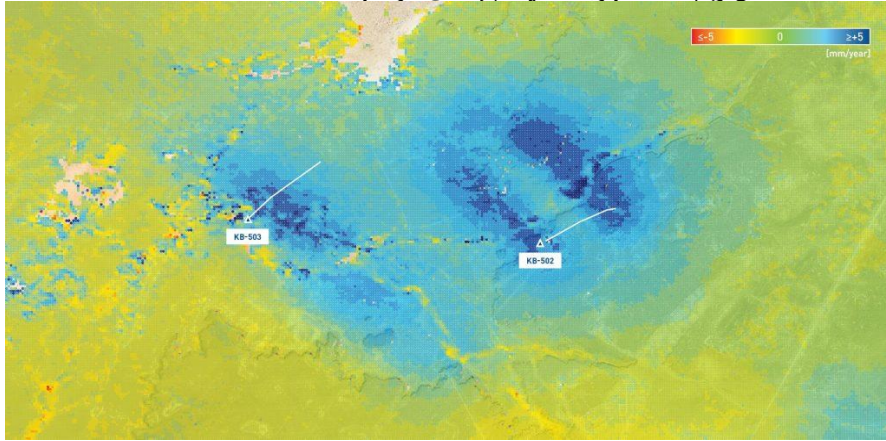
الصورة رقم 1: موقع مشروع عين صالح في جنوب الجزائر



المصدر: (مؤسسة المعرفة، 2020)

يعد هذا المشروع أكبر مشروع مشترك للغاز الجاف في البلاد، حيث يضم سبعة حقول
غازية رئيسية: غور محمود، عين صالح، حاسي مومني، غارة البغينات، كريشبا، ريغ، وتيغ، منها
ثلاثة حقول منتجة حاليا وهي كريشبا، ريغ، وتيغ. المشروع شراكة بين شركة سوناطراك الجزائرية
(35%)، وبريتش بترول يوم BP البريطانية (33%)، وستاتويل النرويجية (32%). بدأ الإنتاج في
يوليو 2004 بطاقة سنوية تقارب 9 مليارات متر مكعب من الغاز، ويتميز بكونه أول وأكبر مشروع
في العالم لاحتجاز وتخزين ثاني أكسيد الكربون على نطاق صناعي في حقل غاز، إلى جانب
مشروع سليببر في النرويج، تقوم التقنية على إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغاز الطبيعي، الذي
يبلغ نسبته بين 7% و 10%، باستخدام سائل الأمين، ثم استخلاصه وضغطه بين 150 و 200
بار، وإعادة حقنه في مكامن جيولوجية عبر ثلاث آبار أفقية عالية التقنية في حقل كريشبا (KB-
501, KB-502, 503) لتوزيع الضغط وتفادي نقاط ضعف جيولوجية (انجيلا، 2009).
كما هي موضحة في الشكل رقم 5.

الشكل رقم 5: الآبار الأفقية في حقل كرشبا KB-503, KB-502

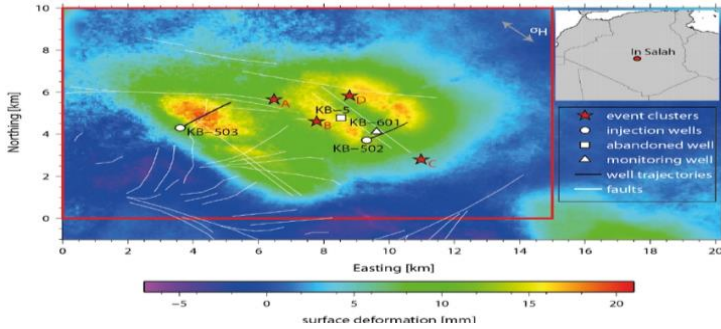


المصدر: (CLS Group Company)

وتصل نسبة ثاني أكسيد الكربون في الغاز النهائي إلى 0.3% فقط، وهو أقل بكثير من المواصفة الأوروبية البالغة 2%. يتم حقن نحو 0.7 مليار متر مكعب من ثاني أكسيد الكربون سنوياً، بهدف الوصول إلى 20 مليون طن خلال 15 سنة، ما أسهم في خفض انبعاثات غازات الدفيئة بنسبة 60% أي ما يعادل انبعاثات 200 ألف سيارة سنوياً. بالإضافة إلى إنشاء وحدات لتثبيت المكثفات في أربع مواقع تغطي مساحة إجمالية تقارب 23000 كم² ضمن حقول الغاز في الصحراء الكبرى، وينقل الغاز من منطقة كرشبة الواقعة في أقصى شمال حقول عين صالح والمخصصة لتخزين ثاني أكسيد الكربون عبر خط أنابيب بطول 455 كيلومتراً إلى حاسي الرمل ليصدر لاحقاً إلى الأسواق الأوروبية عبر إيطاليا، بلغت التكلفة الإجمالية للمشروع حوالي 2.5 مليار دولار أمريكي، ويعد أول تجربة على مستوى العالم لتخزين ثاني أكسيد الكربون في خزان غاز منتج، وأحد أكبر مشروعات البحث والتطوير العالمية في هذا المجال. ويواجه المشروع ظروفًا مناخية صحراوية قاسية حيث تتجاوز درجات الحرارة السطحية في بعض الأيام 60 درجة مئوية (مؤسسة المعرفة، 2020).

من بين التحديات الكبرى ظهور أنماط تشوه سطحية على شكل "lobes" مزدوجة حول بئر KB-502، وارتفاع الضغوط الجيولوجية وتفاعلها مع الطبقات، مما أثار مخاوف من صدع في الغطاء الصخري والتي أدت إلى توقف المشروع مؤقتاً في 2011 (انجيلا، 2009).

الشكل رقم 6: خريطة توضح التشوه السطحي وخطوط الصدع والمسارات الجيولوجية لمواقع الآبار



المصدر: (Ringrose & al, 2013)

الصورة تظهر أن حقن CO₂ في هذه الآبار كان في الطبقة العميقة 1800م، الغاز أحدث زيادة في الضغط داخل مكامن الحقن مما سبب انتفاخات سطحية فوقها خصوصا حول KB-502 و KB-503 هذه الزيادة تسببت في تشوه ميكانيكي للصخور يعني أن الطبقات لم تكن مغلقة تماما كما كان متوقع، إضافة إلى وجود نشاط زلزالي صغير يشكل خطرا بتسرب CO₂ إلى السطح على المدى الطويل، فضلا على أن زيادة الضغط قرب KB-502 كانت حرجة جدا قد تؤدي إلى انتقال الضغط إلى مناطق غير مرغوبة مما أجبر شركة سوناطراك وشركائها على إنهاء الحقن سنة 2011 والاكتفاء بالاستفادة من التجربة العلمية والدروس المستخلصة حيث كان مشروع رائدا عالميا (أول مشروع صناعي كبير لتخزين CO₂ في صحراء الجزائر)

4. تحليل النتائج

- تسعى الجزائر على غرار بقية الدول، إلى مواكبة التحولات العالمية في مجال الانتقال الطاقوي وتقليص البصمة الكربونية، بما يتماشى مع أهداف التنمية المستدامة وأجندة الحياد الكربوني 2050. وبفضل موقعها الجغرافي ومواردها الطبيعية، تُعد الجزائر من بين الدول ذات الإمكانات الكبيرة لتطوير الطاقات المتجددة، خاصة الطاقة الشمسية التي يمكن أن تشكل رافعة أساسية لتنويع مزيجها الطاقوي.

- وقد خطت الجزائر خطوات مهمة في هذا المجال من خلال إطلاق برامج وطنية لتنمية الطاقات المتجددة والفعالية الطاقوية، إذ أعلنت عن مشاريع كبرى لتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية والرياح، إلى جانب تشجيع الاستثمار في الهيدروجين الأخضر باعتباره وقود المستقبل. كما

برزت تجربتها الرائدة في مشروع عين صالح لاحتجاز وتخزين الكربون، الذي يُعد الأول من نوعه في إفريقيا والعالم العربي، في إطار شراكة بين شركة سوناطراك وشركات دولية، ما يعكس وعياً متزايداً بضرورة إدماج تقنيات حديثة للحد من الانبعاثات.

- مشروع النقاط وتخزين الكربون في إن صالح هو تجربة علمية متقدمة أثبتت إمكانية تخزين CO2 بأمان نسبي في الجزائر، مع دروس جوهرية لتعزيز البحوث المستقبلية تعتبر مفتاح في التقييم الدقيق للجيولوجية الميدانية ودمج الرصد السطحي تحت شبكة آمنة، كما يشكل نموذجاً عالمياً لتطبيق تقني عالي التقنية على الأرض الجزائرية، سلط الضوء على أهمية التخطيط المتكامل والمراقبة الدقيقة والمرونة التشغيلية في مشاريع مكافحة التغير المناخي.
- إضافة إلى ذلك، اعتمدت الجزائر برامج للتشجير وإعادة تأهيل المساحات الغابية لمواجهة التصحر وخفض الانبعاثات، فضلاً عن انخراطها في المبادرات الدولية الخاصة بمكافحة التغير المناخي. ورغم التحديات المتمثلة في التمويل، نقل التكنولوجيا، وضعف البحث العلمي التطبيقي، فإن الجزائر تبقى في موقع استراتيجي يمكنها من تعزيز دورها كفاعل إقليمي في مجال الاقتصاد الأخضر، خاصة إذا أحسنت استغلال مواردها الطبيعية والبشرية، وشجعت على الابتكار والاستثمار في القطاعات النظيفة.
- وبذلك فإن الجزائر، رغم الفجوة القائمة بينها وبين بعض الدول الرائدة، تملك فرصة حقيقية لترسيخ موقعها في مسار التنمية المستدامة والحياد الكربوني بحلول 2050، شريطة تسريع ونيرة الإصلاحات وتفعيل شراكات دولية قوية لنقل المعرفة والتكنولوجيا.

5. خاتمة

أظهرت هذه الدراسة أن التغير المناخي وما ينجر عنه من ارتفاع في الانبعاثات الكربونية يمثل تحدياً بيئياً واقتصادياً يتطلب تبني حلول مبتكرة ومستدامة. وقد تبين أن التقنيات الخضراء تعد رافعة أساسية للحد من البصمة الكربونية، عبر الاعتماد على الطاقات المتجددة، والهيدروجين الأخضر، وتكنولوجيات احتجاز الكربون وتخزينه، بالإضافة إلى الطاقة النووية، بما يسهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة والتحول نحو الاقتصاد الأخضر.

أما بالنسبة للجزائر، فقد أظهرت النتائج أنها تملك إمكانيات معتبرة تؤهلها للتموقع في هذا المسار، خاصة من خلال مواردها الشمسية الهائلة وتجربتها الرائدة في مشروع عين صالح، إضافة

إلى البرامج الوطنية للتشجير وتوسيع استعمال الطاقات المتجددة. غير أن هذه الجهود ما تزال تواجه عدة تحديات تتعلق أساسًا بنقص التمويل، صعوبة نقل التكنولوجيا، وضعف البحث العلمي التطبيقي، وهو ما يعيق تسريع وتيرة الانتقال الطاقوي.

6. أهم النتائج:

1. البصمة الكربونية تمثل أداة مركزية لتقييم جهود الاستدامة والحد من الانبعاثات؛
2. التقنيات الخضراء تساهم بفعالية في تقليص الانبعاثات وتدعم التحول نحو الحياد الكربوني؛
3. الجزائر تمتلك قدرات واعدة في الطاقات المتجددة والتقاط الكربون، لكنها لم تستثمرها بعد بالشكل الكافي؛
4. الفجوة بين الإمكانيات المتوفرة والتطبيق العملي تعيق التقدم السريع نحو أهداف 2030 و2050.

7. التوصيات:

- تعزيز الاستثمار في البحث العلمي والتطوير لتوطين التكنولوجيا الخضراء في الجزائر؛
- وضع سياسات تحفيزية لجذب الاستثمارات الأجنبية في مجالات الطاقة النظيفة والهيدروجين الأخضر؛
- دعم برامج التدريب والتعليم لنشر الوعي البيئي وبناء كفاءات بشرية قادرة على مواكبة التحول الطاقوي؛
- تطوير شراكات دولية فعالة لنقل الخبرات والتقنيات الحديثة؛
- تسريع الانتقال نحو الاقتصاد الأخضر من خلال إدماج البعد البيئي في جميع الاستراتيجيات التنموية.

8. قائمة المراجع

1. الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ. (2011). مصادر الطاقة المتجددة والتخفيف من آثار تغير المناخ ملخص لصانعي السياسات وملخص فني. ألمانيا: معهد بوتسدام لبحوث تأثير المناخ.

2. center for international environmental law. (بلا تاريخ). احتجاز الكربون وتخزينه (ccs): الأسئلة الشائعة. تاريخ الاسترداد 14 08 2025، من احتجاز الكربون وتخزينه (ccs): الأسئلة الشائعة: <https://www.ciel.org>
3. CLS Group Company. (بلا تاريخ). carbon capture and storage In-Salah- CCS. تاريخ الاسترداد 15 08 2025، من <https://site.tre-altamira.com/showcase/carbon-capture-and/-storage-in-salah>
4. International Energy Agency. (بلا تاريخ). Carbon Capture Utilisation and Storage- Energy System- IAE. تاريخ الاسترداد 14 08 2025، من <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>
5. International Institute for Sustainable Development. (2023, 11 28). Unpacking Carbon Capture and Storage: The technology behind the promise. تاريخ الاسترداد 14 08 2025، من <https://www.iisd.org/articles/insight/unpacking-carbon-capture-storage-technology>
6. مي مجدي. (03 11 2024). أكثر الدول النقاطا للكربون في العالم....3 بلدان عربية بالقائمة. تاريخ الاسترداد 16 08 2025، من <https://attaqa.net/2024/11/03/%D8%A3%D9%83%D8%AB%D8%B1-%D8%A7%D9%84%D8%AF%D9%88%D9%84-%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%82%D8%A7%D8%B7%D9%8B%D8%A7-%D9%84%D9%84%D9%83%D8%B1%D8%A8%D9%88%D9%86-%D9%81%D9%8A-%D8%A7%D9%84%D8%B9%D8%A7%D9%84%D9%85>
7. National Grid Group. (26 03 2024). ما هو النقاطا الكربون وتخزينه. الشبكة الوطنية. تاريخ الاسترداد 14 08 2025، من https://www.nationalgrid.com.translate.google/stories/energy-is-ccs-how-does-it-6explained/what_x_tr_pto=tc_x_tr_hl=ar_x_tr_tl=ar_x_work?_x_tr_sl=en
8. P.S Ringrose، و al. (2013). the in salah co2 storage project: lessons learned and knowledge transfer. تاريخ الاسترداد 16 08 2025، من <https://www.resmanenergy.com/insights/scientific-articles/the-in-salah-co2-storage-project-lessons-learned-and-knowledge-transfer>
9. أحمد محمد مرفت رشاد، و حسونة علي أيمن جابر. (2017). التطبيقات الخضراء لتكنولوجيا النانو في المستقبل. المؤتمر الدولي السابع للاتحاد العربي للتنمية المستدامة والبيئة "سبل تعزيز

التكنولوجيا النظيفة والتقنيات صديقة البيئة بالمنطقة العربية (صفحة 04). مصر: جامعة عين شمس.

10. آخرون رواد أحمد كريم. (2019). دور تكنولوجيا النانو في تحسين البيئة الداخلية للمباني وتقليل التدهور البيئي المؤتمر الهندسي الثاني لنقابة المهن. (صفحة 607). ليبيا: الزاوية ليبيا.

11. أغاويك انجبال. (05, 2009). احتجاز الكربون وتخزينه في الصحراء الجزائرية. تاريخ الاسترداد 08, 15, 2025، من [http://afedmag.com/web/ala3dadAlSabiaSections-cat\\$type=4=\\$=issue\\$details.aspx?id=479](http://afedmag.com/web/ala3dadAlSabiaSections-cat$type=4=$=issue$details.aspx?id=479)

12. الأمم المتحدة. (بلا تاريخ). العمل المناخي: تعريف الطاقة المتجددة. تاريخ الاسترداد 01, 13, 2024، من <https://www.un.org/ar/climatechange/what-is-renewable-energy>

13. الوكالة الدولية للطاقة المتجددة IRENA. (2022). نظرة مستقبلية لتحولات الطاقة حول العالم 2022 الطريق لـ 1,5 درجة مئوية. أبوظبي.

14. حسينة صيفي. (2020). آليات التكنولوجيا الخضراء ودورها في تحقيق التنمية البيئية المستدامة. مجلة الحوكمة المسؤولية الاجتماعية والتنمية المستدامة ، 02 (02)، 09.

15. سلامة محمد عبد الرحمن. (2023). ماهي البصمة الكربونية وطرق حسابها وطرق تخفيضها؟ مجلة الأرصاد الجوية ، 69 (69)، 29.

16. طه واكد. (23, 10, 2023). خواص الأبنية الخضراء، صدی الاستدامة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. تاريخ الاسترداد 01, 13, 2024، من <http://www.ecomena.org/green/-buildings-ar>

17. عز الدين رجب. (30, 06, 2025). أكبر الدول في قدرة احتجاز الكربون واستعماله وتخزينه دولتان عربيتان بالقائمة. تاريخ الاسترداد 08, 16, 2025، من

<https://attaqa.net/2025/06/30/%D8%A3%D9%83%D8%A8%D8%B1-%D8%A7%D9%84%D8%AF%D9%88%D9%84-%D9%81%D9%8A-%D9%82%D8%AF%D8%B1%D8%A9-%D8%A7%D8%AD%D8%AA%D8%AC%D8%A7%D8%B2-%D8%A7%D9%84%D9%83%D8%B1%D8%A8%D9%88%D9%86-%D9%88%D8%A7%D8%B3%D8%AA>

18. مركز الأهرام للدراسات السياسية والاستراتيجية. (16, 11, 2022). سبل تعزيز دور التكنولوجيا في مواجهة التغير المناخي COP27. تاريخ الاسترداد 01, 08, 2024، من <https://acpss.ahram.org.eg/News/17684.aspx>

19. منى أحمد عبد القادر الزغول. (2023). الكيمياء الخضراء واستخدامها في مشاريع المجتمع المحلي والبلديات. مجلة العلوم الانسانية والطبيعية ، 04 (03)، 709.
20. مؤسسة الإمارات للطاقة النووية. (09, 2023). الطاقة النووية من أجل الحياد المناخي تحظى باهتمام المشاركين في قمة سياسات الطاقة النووية. تاريخ الاسترداد 04 01, 2024، من <https://www.enec.gov.ae/ar/news/latest-news/net-zero-nuclear-builds-momentum-in-new-york-city/-showcase>
21. مؤسسة المعرفة. (06 02, 2020). مشروع احتجاز ثاني أكسيد الكربون في عين صالح المعرفة. تاريخ الاسترداد 16 08, 2025، من https://www.marefa.org/%D9%85%D8%B4%D8%B1%D9%88%D8%B9_%D8%A7%D8%AD%D8%AA%D8%AC%D8%A7%D8%B2_%D8%AB%D8%A7%D9%86%D9%8A_%D8%A3%D9%83%D8%B3%D9%8A%D8%AF_%D8%A7%D9%84%D9%83%D8%B1%D8%A8%D9%88%D9%86_%D9%81%D9%8A_%D8%B9%D9%8A%D9%86_%D8%B5%D8%A7%D9%84%D8%AD
22. هدى بوحنيك، و رباب زارع. (2018). واقع الإنفاق البيئي في ظل التنمية المستدامة عرض تجريبي تونس والجزائر. مجلة دراسات في الاقتصاد وإدارة الأعمال (02)، 16.
23. وافي حاجة. (2017). دور المباني الخضراء في المحافظة على الاستدامة البيئية. مجلة تشريعات التعمير والبناء (04)، 181.