# المكانة المستقبلية للكهرباء النووية ضمن المزيج الطاقوي العالمي

# The future place of nuclear power in the global energy mix

# La place future de l'électricité nucléaire dans le mix énergétique mondial

**ياسين بوعاملي[1]***

**تاريخ الإرسال:** 2019/01/27 **تاريخ القبول:** 2019/12/28 **تاريخ النشر:**2020/12/30

**ملخص:**

تطورت الطاقة النووية السلمية في خمسينيات القرن الماضي في نواحي مختلفة من العالم، وقد بدا أول الأمر أنها سوف تشكل مصدرا لا ينفذ للكهرباء منخفضة التكلفة. لكن بعد توسع معتبر تم تجاوز حدود التكلفة في أعقاب حادثين نويين خطيرين في الثمانينات تلتهما حادثة فوكوشيما سنة 2011، ما أدى إلى تغير النظرة تجاه سلامة وتكاليف الطاقة النووية. يهدف هذا المقال إلى تحليل العوامل التي يمكن أن تلعب دورا مهما في تحديد مستقبل الكهرباء النووية بعد الادراك المتنامي في السنوات الأخيرة لخطر التغيرات المناخية الناجم عن استهلاك المحروقات، وقد توصلنا من خلال تحليل مقارن إلى أن مستقبل الكهرباء النووية سوف يتباين بشكل كبير من دولة لأخرى، لأنه يرتبط بمختلف التقديرات المحلية لكل المخاطر الطاقوية والتكاليف الحقيقية لكل مصدر.

**الكلمات المفتاحية:** طاقة نووية، مزيج طاقوي، سلامة نووية، تكاليف، تغير مناخي.

**Abstract:**

Civil nuclear energy has developed in the 1950s in many parts of the world; it seemed at first that it would provide an inexhaustible source of low-cost electricity. However, after considerable expansion, significant cost overruns after two serious nuclear energy accidents in the 1980s followed by that of Fukushima in 2011 changed the perception of the safety and cost of nuclear energy. The purpose of this article is to analyze the factors that may determine the future of nuclear power after the growing realization in recent years of the risk of climate change related to the consumption of hydrocarbons. The article concludes, after a comparative analysis that the future of nuclear power would vary considerably from one country to another, according to the different local assessments of all energy risks and the real costs of each source.

**Keywords**: nuclear energy, energy mix, nuclear safety, costs, climate change.

**Résumé :**

L'énergie nucléaire civile s'est développée dans de nombreuses régions du monde dans les années 50 ; il semblait au début que cela fournirait une source inépuisable d'électricité bon marché. Cependant, après une expansion considérable, d'importants dépassements des coûts après deux accidents nucléaires graves dans les années 1980 suivis de celui de Fukushima en 2011, ont modifié la perception de la sûreté et du coût de l'énergie nucléaire. L'objectif de cet article est

*المؤلف المراسل

[1]Yassine Bouamli, Department of Economics, Abdelhamid Mehri-constantine2 university: Algeria, yassine.bouamli@univ-constantine2.dz.

d'analyser les facteurs qui pourront déterminer l'avenir de l'électricité nucléaire après la prise de conscience croissante ces dernières années du risque de changement climatique engendrépar la consommation d'hydrocarbures. L'article conclut, après une analyse comparative, que l'avenir de l'électricité nucléairevarierait considérablement d'un pays à l'autre en fonction des différentes évaluations locales de tous les risques énergétiques et des coûts réels de chaque source.

**Mots clés** : énergie nucléaire, mix énergétique, sureté nucléaire, coûts, changement climatique.

**مقدمة**

بدأ توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة النووية سنة 1954م، وقد اعتبر هذا النوع من الطاقة في بداية الأمر مصدرا جديدا واعدا لا حدود له باعتباره يوفر الطاقة الكهربائية الأرخص من بين جميع المصادر، إلا أن تعاقب الحوادث النووية منذ الثمانينات أدى إلى تراجع انشاء محطات الطاقة الكهربائية النووية في التسعينات. لكن مع بداية الألفية الثالثة ارتفع الطلب على المحروقات بشكل كبير وارتفعت أسعارها نتيجة لذلك، وأدى ذلك إلى تجدد المخاوف من نضوب النفط، كما تزايد الاهتمام العالمي بظاهرة الاحتباس الحراري الذي تتزايد الأدلة العلمية بشأنه، حيث أصبح هناك القليل من الشك في أن الاستخدام الواسع للوقود الاحفوري يؤدي إلى زيادة حرارة الأرض، كل هذه العوامل دفعت بالكثير من الدول للسعي إلى تطوير مصادر بديلة للطاقة كالطاقة المتجددة والطاقة النووية، إلا أن مستقبل الطاقة النووية على الصعيد العالمي لا يزال يتراوح بين الخوف والأمل، خاصة مع حادثة فوكوشيما في اليابان سنة 2011، والتي قررت في اعقابها دول تخليها تدريجيا عن الطاقة النووية، بينما قررت دول أخرى مواصلة مشاريعها النووية، وهو ما يدعو إلى طرح التساؤل التالي:

**إشكالية البحث:**

ما هي المكانة المستقبلية للطاقة الكهربائية النووية ضمن المزيج الطاقوي العالمي في ظل المستجدات العالمية الراهنة؟

هذا السؤال يمكن تقسيمه إلى الأسئلة الفرعية التالية:

- هل يمكن الاعتماد على المحروقات والطاقات المتجددة فقط في انتاج الكهرباء واستبعاد الخيار النووي في ظل تنامي المخاوف من مخاطر الطاقة النووية؟
- ماهي العوامل التي تؤثر على مكانة الطاقة الكهربائية النووية ضمن المزيج الطاقوي العالمي في المستقبل؟

**فرضيات البحث:**

لمعالجة هذا الموضوع تم صياغة الفرضيات التالية:

- لا يمكن التخلي بشكل كامل عن انتاج الكهرباء من الطاقة النووية بسبب عدم قدرة المحروقات والطاقة المتجددة على تلبية الطلب العالمي المتزايد، كما أن المخاطر مرتبطة بكل أشكال الطاقة ولا تخص الطاقة النووية وحدها.
- تتحدد المكانة المستقبلية للطاقة الكهربائية النووية على الصعيد العالمي بمجموعة من العوامل تتعدى قضايا التكلفة وأمان المحطات النووية.

**أهمية البحث:**

تبرز أهمية هذا البحث من خلال السعي الكبير لتنويع مصادر الطاقة على الصعيد العالمي، بسبب ارتفاع الطلب على الطاقة وارتفاع أسعار المحروقات نتيجة لذلك، بالإضافة إلى تزايد الاهتمام العالمي بإيجاد مصادر طاقة لا تؤدي إلى زيادة غازات الاحتباس الحراري.

وسوف نحاول الإجابة على التساؤلات السابقة من خلال المباحث التالية:

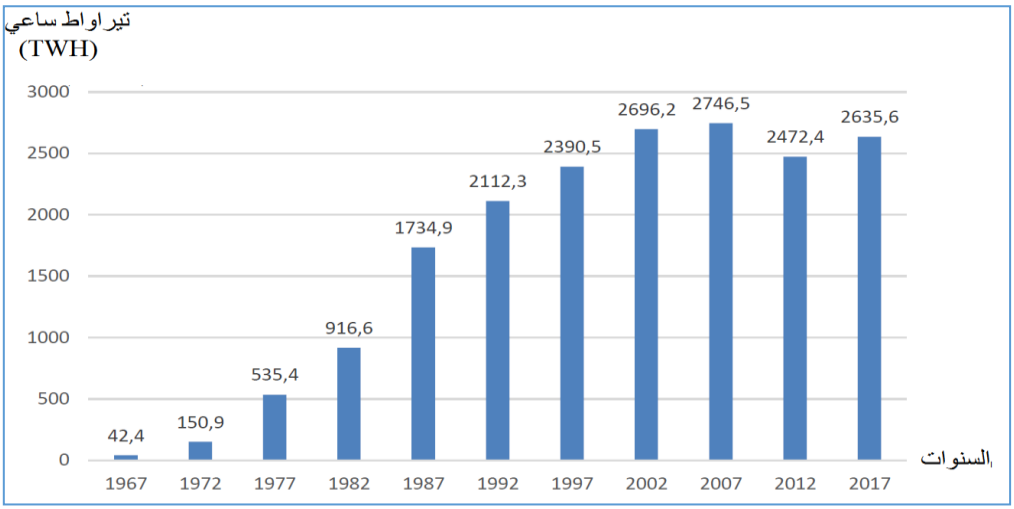
## 1- لمحة تاريخية

تعود فكرة الطاقة النووية إلى بداية القرن العشرين حين قدم ألبرت أينشتاين نظرية النسبية سنة 1905 والتي تنص على إمكانية تحول المادة إلى طاقة، وقد توالت بعدها الاكتشافات وتناوب الباحثون في اكتشاف مجال النواة، وكان الألمانيان أوتو هان (Otto Hahn) وفريتز ستراسمان (Fritz Strassmann) أول من تصور أنه يمكن لنواة اليورانيوم التي يتم شطرها إلى اثنين أن تخلق شظايا أخف وزنا مع تحرير كمية هائلة من الطاقة، وفي عام 1939 تمكن كل من البريطاني أوتو فريش (Otto Frisch) والفرنسي فريدريك جوليو كوري (Frédéric Joliot-Curie) من اجراء تجربة أول انشطار نووي (مون، 2014، صفحة 35). تركزت الأبحاث في هذه الفترة على استخدام الطاقة النووية لأغراض عسكرية خلال الحرب العالمية الثانية، وأدت في الأخير إلى قصف الولايات المتحدة الامريكية لمدينتي هيروشيما وناكازاكي في اليابان، وهو التفجير الذي خلف أكثر من 200.000 قتيل.

وبعد نهاية الحرب بدأ الاهتمام بتسخير الطاقة النووية لتوليد الكهرباء، فقد بدأت أول محطة في توليد الكهرباء من الطاقة النووية في روسيا سنة 1954 وبقدرة عظمى بلغت 05 ميغاواط كهربائي فقط، وعلى الصعيد التجاري تعتبر محطة كالدر هول (Calder Hall) أول محطة نووية يتم تدشينها، وكان ذلك في بريطانيا سنة 1956، وهي مؤلفة من أربعة مفاعلات لكل منها قدرة كهربائية عظمى تقدر بـ 50 ميغاواط كهربائي(Evans, 2007, p. 115).في تلك الفترة بدا أن هذا المصدر سوف يؤمن الكهرباء في المستقبل بتكلفة منخفضة، وقد توسعت الكثير من الدول في انشاء محطات نووية لإنتاج الكهرباء في الستينات والسبعينات من القرن العشرين، لكن تعاقب الحوادث النووية بداية من حادثة منشأة ثري ميل ايسلاند(Three Mile Island Plant) في الولايات المتحدة الأمريكية سنة 1979، ثم حادثة

تشيرنوبيل في الاتحاد السوفياتي سابقا سنة 1986 دفع إلى تغير النظرة التفاؤلية فيما يخص أمان محطات الطاقة النووية، كما تزايدت تكلفة هذا المصدر لتلبية متطلبات السلامة الجديدة، وأدى ذلك إلى انخفاض مفاجئ في بناء محطات الطاقة الكهربائية النووية في مختلف ارجاء العالم، ثم جاءت حادثة فوكوشيما في اليابان سنة 2011 لتعزز من هذه المخاوف. لكن مستقبل الطاقة النووية لا يزال يتراوح بين الطموح والخوف، طموح يغديه نمو الاقتصاد العالمي وتزايد الطلب العالمي على الطاقة بالإضافة إلى السعي لإيجاد مصادر طاقوية لا تؤدي إلى إطلاق غازات الاحتباس الحراري، بينما يعزز المخاوف تكرر الحوادث النووية. الشكل التالي يوضح تطور انتاج الطاقة الكهربائية النووية منذ سنة 1967:

**الشكل رقم–1–**: تطور انتاج الطاقة الكهربائية النووية على الصعيد العالمي بين 1967 و2017




**المصدر**: تم اعداده بالاعتماد على احصائيات بريتش بتروليوم (British Petroleum, 2018)

يتضح من الشكل رقم –1– أن تطور انتاج الطاقة الكهربائية النووية عالميا ارتفع بشكل كبير جدا خلال عقدي الستينات والسبعينات والنصف الأول من عقد الثمانينات، ويعود هذا التطور الكبير في الإنتاج إلى إطلاق أولى المحطات النووية التجريبية ثم إطلاق محطات الجيل الأول خلال عقدي الخمسينات والستينات، ومحطات الجيل الثاني خلال السبعينات والتي كانت تهدف لزيادة تنافسية الطاقة الكهربائية النووية وتخفيض التبعية تجاه المحروقات بعد الصدمة النفطية لسنة 1973. ورغم أن إنتاج الطاقة الكهربائية من المصدر النووي واصل تطوره حتى بداية الألفية الثالثة، إلا أن ذلك كان بمعدلات نمو أقل بشكل ملحوظ منذ نهاية الثمانينات، ويعود ذلك إلى تراجع إنشاء محطات جديدة في أعقاب حادثة المفاعل النووي لتشيرنوبيل في أوكرانيا سنة 1986 بسبب زيادة المخاوف وارتفاع تكاليف السلامة في المحطات الجديدة. وقد واصل انتاج الكهرباء من المصدر النووي نموه في بداية الالفية الثالثة بمعدلات تقل بكثير عن تلك الخاصة بفترة السبعينات والنصف الأول من الثمانينات، حيث دفع ارتفاع الطلب العالمي على مصادر الطاقة وارتفاع أسعارها وتزايد

المخاوف من التغيرات المناخية إلى تأكيد ضرورة تطوير المصادر البديلة، لكن مخاوف السلامة النووية تعززت من جديد بعد حادثة فوكوشيما في اليابان في مارس 2011، حيث يوضح الشكل انخفاضا محسوسا في انتاج الكهرباء النووية سنة 2012، لكن رجعت بعدها معدلات النمو ببطء مترجمة استمرار تراوح الطاقة النووية بين الخوف والأمل، حيث قررت دول التخلي التدريجي عنها أو عدم استعمالها كألمانيا وإيطاليا وسويسرا، بينما أكدت دول أخرى كالصين والهند استمرارها في تطوير الطاقة الكهربائية النووية.

## 2 – تكنلوجيا انتاج الكهرباء من الطاقة النووية

ينتج المفاعل النووي الحرارة اللازمة لتوليد البخار الذي يعمل على تدوير توربين بخاري تقليدي، ويختلف عن محطات الكهرباء التي تعمل على الفحم أو الغاز في طريقة توليد الحرارة التي تتم من خلال الانشطار النووي، في حين يتم ذلك في محطة الوقود الاحفوري من خلال الاحتراق الداخلي(O'Keefe, 2010, p. 140).

### 2–1– المكونات الرئيسية للمفاعل النووي:

يعتبر المفاعل النووي التكنلوجيا الأساسية المستخدمة في استغلال طاقة الانشطار النووي، وأهم مكوناته:

#### 2–1–1– الوقود

تستخدم كل المفاعلات تقريبا اليورانيوم كوقود، ويتألف اليورانيوم الطبيعي عادة كما هو متواجد في الطبيعة من حوالي 99.3% من اليورانيوم $U^{238}$ غير القابل للانشطار و0.7% المتبقية من نظير اليورانيوم $U^{235}$ القابل للانشطار، ويسخر انتاج الطاقة النووية الكمية الهائلة من الطاقة الحرارية التي يتم تحريرها خلال تفاعل الانشطار النووي.

#### 2–1–2– الوسيط

عند الانشطار تكون النيوترونات سريعة تمر بمعظم اليورانيوم دون أن يتم امتصاصها ولا تحدث تفاعلات انشطارية لاحقة، والوسيط هو مادة تعمل على ابطاء النيوترونات بشكل يسمح بامتصاصها ويحدث تفاعلات انشطارية متسلسلة.

#### 2–1–3– المبرد

يؤدي تفاعل الانشطار النووي إلى إطلاق حرارة عالية جدا تستدعي استخدام مادة مبردة كالماء، وتعمل على امتصاص الحرارة من المفاعل النووي بما يسهل من عمليات التحكم في المفاعل النووي.

#### 2–1–4– قلب المفاعل

تحدث التفاعلات النووية الانشطارية على مستوى قلب المفاعل، وهو وعاء توضع بداخله قضبان تحتوي على الوقود، وعادة يوضع قلب المفاعل بدوره ضمن وعاء فولادي سميك يعمل على منع تسرب الاشعاعات.

### 2-1-5- قضبان التحكم

تصنع قضبان التحكم من مواد خاصة تعمل على امتصاص النيوترونات وأهمها: البورون، الفضة، الإنديوم، والكادميوم (OCDE, 2003, p. 17)، ويؤدي تحريكها إلى خارج قلب المفاعل الى زيادة التفاعل الانشطاري، بينما يؤدي تحريكها بالكامل إلى داخله إلى إيقاف التفاعل الانشطاري (Evans, 2007, p. 117).

### 2-2- أنواع المفاعلات النووية

تختلف المفاعلات النووية حسب التصميم وطبيعة المبرد والوسيط المستعملين، وأهم أنواع المفاعلات:

### 2-2-1- مفاعلات الماء الخفيف

تعتمد معظم المحطات النووية على الماء الخفيف وهو الماء العادي، والذي يستعمل كمبرد ووسيط. للماء العادي قابلية ضعيفة ليعمل كوسيط ولهذا يتوجب في هذه الحالة تخصيب اليورانيوم من خلال زيادة تركيز النظير $U^{235}$.

#### أ- مفاعلات الماء المغلي (BWR)

يعتبر مفاعل الماء المغلي (Boiling Water Reactor) أبسط أنواع المفاعلات، ولكنه الأقل انتشارا على الصعيد العالمي بسبب زيادة عنصر الخطر رغم انتشاره في بعض الدول كما هو الحال في اليابان، حيث أن ثلثي المفاعلات النووية في هذا البلد ومنها مفاعل فوكوشيما هي من هذا النوع (Basdevant, 2012, pp. 100-101). في هذه المفاعلات يتم استخدام دورة واحدة للماء كوسيط وكمبرد وكبخار لإدارة توربين المولد الكهربائي، ويعمل بخار الماء المتشكل في قلب المفاعل على زيادة درجة حرارته ويعقد من عملية التحكم (Evans, 2007, p. 118)

#### ب- مفاعلات الماء المضغوط (PWR)

يعتبر مفاعل الماء المضغوط (Pressurized Water Reactor) النوع الأكثر انتشارا من المفاعلات النووية على الصعيد العالمي، كما يعتبر النوع الحصري في بعض الدول كفرنسا، وفيه يتم استخدام الماء المضغوط كوسيط وكمبرد في الوقت نفسه (Basdevant, 2012, p. 94). في الدارة الأولى يستعمل الماء كوسيط ومبرد أولي تحت درجة عالية من الضغط تمنعه من الغليان وبالتالي يتم تجنب تشكل البخار في قلب المفاعل، بينما في الدورة الثانية يستعمل الماء كمبرد ثانوي تحت ضغط أقل يسمح بغليان الماء وتشكل البخار الذي يغدي المولد الكهربائي.

### 2-2-2- مفاعلات الماء الثقيل

يعتبر الماء الثقيل أو أكسيد الديوثريوم أكثر فعالية في ابطاء النيوترونات الناتجة عن التفاعلات الانشطارية بما يضمن حدوث تفاعلات متسلسلة واستخدام اليورانيوم الطبيعي كوقود بدلا من اليورانيوم المخصب (O'Keefe, 2010, p. 146)، وقد تم تطوير مفاعلات الماء الثقيل بشكل واسع في كندا من خلال تصميم كاندو (CANDU).

### 2-2-3- مفاعلات الغرافيت

استخدمت مفاعلات الغرافيت (RBMK) في دول الاتحاد السوفياتي سابقا، وهي مفاعلات تستخدم الغرافيت كوسيط والماء كمبرد ومولد للبخار. لكن تحول الماء من الطور السائل إلى البخار في قلب المفاعل يؤدي إلى زيادة درجة حرارته ويصعب من عمليات التحكم في المفاعل.

### 2-2-4- مفاعلات الغاز

في هذا النوع من المفاعلات يستعمل غاز مثل ثاني أكسيد الكربون كمبرد أولي يدفع إلى قلب المفاعل ويسحب لينقل الحرارة إلى الماء العادي كمبرد ثانوي، مثل مفاعل الماغنوكس (Magnox Reactor) الذي تم تطويره في بريطانيا.

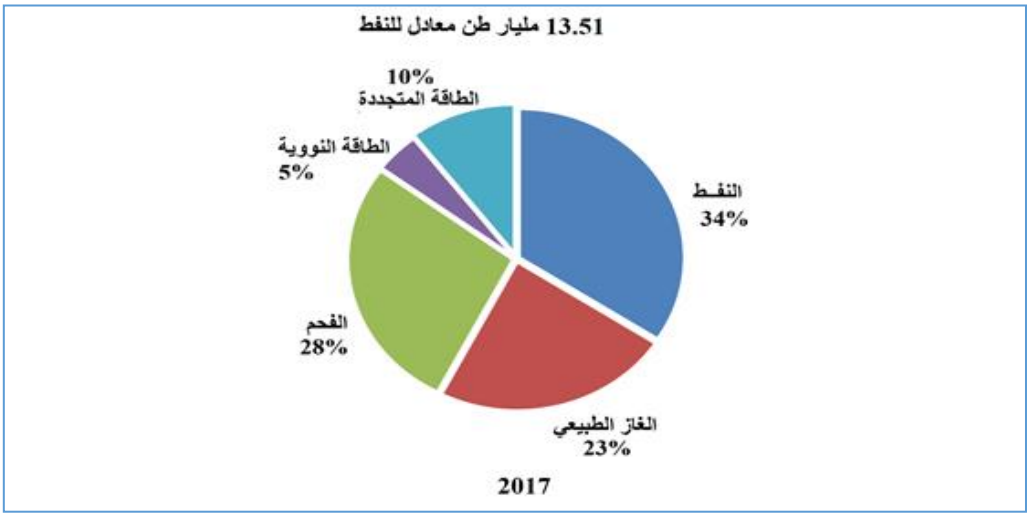
### 2-2-5- المفاعلات المولدة

المفاعل المولد (Breeder Reactor) هو مفاعل ينتج الوقود أكثر مما يستهلك من خلال اعادة تدوير نفايات اليورانيوم المستعمل لاستخراج أنواع أخرى من الوقود أهمها البلوتونيوم $Pu^{239}$ الذي يمكن استعماله كوقود في مفاعل نووي، لكن هذا النوع من المفاعلات لا يزال على شكل مختبرات ولم يدخل حيز الاستغلال التجاري.

## 3-المكانة الحالية للطاقة النووية ضمن المزيج الطاقوي العالمي

الشكل التالي يوضح توزيع الاستهلاك العالمي من الطاقة الأولية حسب المصدر سنة 2017:

**الشكل رقم -2-**: الاستهلاك العالمي من الطاقة الأولية حسب المصدر سنة 2017

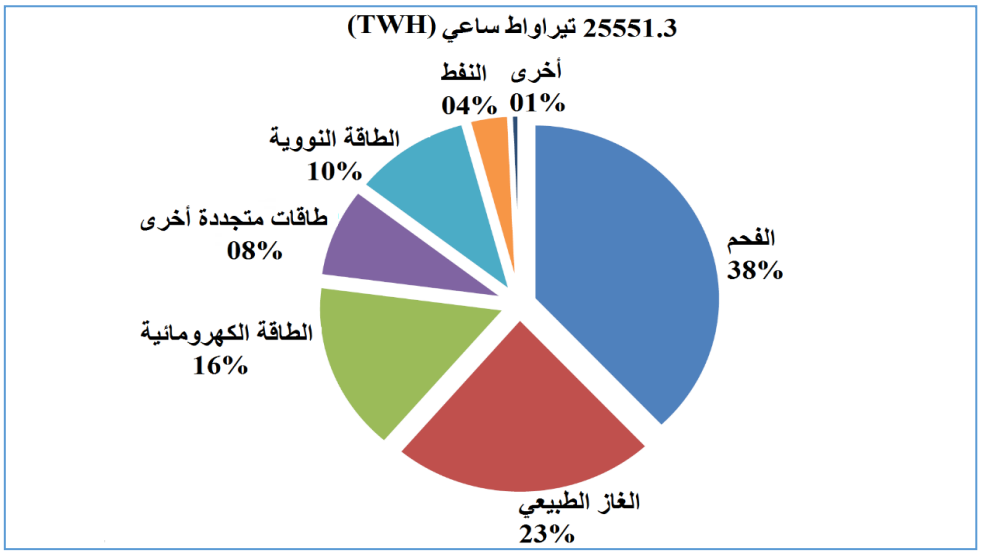



**المصدر**: تم اعداده بالاعتماد على احصائيات بريتش بتروليوم (British Petroleum, 2018)

يتضح من الشكل أن المحروقات لا تزال تسيطر على حوالي 85% من الاستهلاك العالمي للطاقة الأولية، حيث يأتي النفط في المقدمة بـ 34% علما أنه الوقود الرئيسي في قطاع النقل، بينما يستخدم بنسب ضعيفة في انتاج الكهرباء

في بعض الدول فقط، ثم يأتي الفحم بنسبة 28% ويستعمل في معظمه في توليد الكهرباء وبدرجة أقل في توفير الحرارة للعمليات الصناعية. أما الغاز الطبيعي فيستحوذ على 23% من مجموع الاستهلاك العالمي، ويستعمل لإنتاج الكهرباء وتدفئة الأبنية السكنية والخدمية. أما الطاقة المتجددة فلا تستحوذ سوى على 10% من مجموع الاستهلاك العالمي، وتستحوذ الطاقة النووية على النسبة الأضعف بين جميع مصادر الطاقة الأولية، حيث شكلت 05% من مجموع الاستهلاك العالمي. لكن ما يميز الطاقة النووية عن المصادر الأخرى هو أن انتاجها بالكامل عبارة عن كهرباء. الشكل التالي يوضح انتاج الطاقة الكهربائية حسب المصدر سنة 2017:

**الشكل رقم –3–**: توزيع انتاج الكهرباء حسب المصدر عالميا سنة 2017




**المصدر**: تم اعداده بالاعتماد على احصائيات بريتش بتروليوم (British Petroleum, 2018)

يتضح من الشكل أن المحروقات تستخدم في انتاج 65% من الكهرباء المنتجة عالميا، حيث يأتي الفحم في المرتبة الأولى بنسبة 38% رغم أنه ذو قيمة حرارية منخفضة مقارنة بالنفط والغاز، كما أنه الأكثر تلويثا للبيئة مقارنة بهما، لكنه يستعمل بشكل كبير في الكثير من مناطق العالم خاصة في الدول النامية كالصين والهند، ويعود ذلك بشكل أساسي لانخفاض أسعاره نسبيا وتوافر احتياطاته في العديد من المناطق عكس احتياطات النفط التي تتميز بالتركيز خاصة في الشرق الأوسط. ويأتي الغاز الطبيعي في المرتبة الثانية بنسبة 23%، حيث زاد استعماله في انتاج الكهرباء منذ التسعينات في الكثير من الدول كالولايات المتحدة الأمريكية وبريطانيا التي عوضته مكان الفحم بعد تطور المحطات الكهربائية الحرارية من نوع "التوربينات الغازية ذات الدورة المركبة" (Combined Cycle Gas Turbine-CCGT)، والتي تتميز بكلفة انتاج اقل مقارنة مع المحطات الغازية التقليدية. ثم تأتي الطاقة الكهرومائية في المرتبة الثالثة بنسبة 16%، لكن هذا النوع يعتمد بشكل كبير على طبيعة الجغرافيا ويصعب تطويره مستقبلا لأن معظم الأماكن الملائمة للإنتاج كبير الحجم قد تم

تطويرها بالفعل في مختلف دول العالم. أما انتاج الكهرباء من المصدر النووي فيأتي في المرتبة الرابعة بنسبة 10% من مجموع الإنتاج العالمي للكهرباء، وهي مرتبة متقدمة عن الطاقة المتجددة غير المائية والتي تستحوذ على 08% من الإنتاج العالمي للكهرباء.

لكن الطاقة النووية تتميز بالتركيز، حيث تتواجد في بعض الدول فقط وبنسب معتبرة من المزيج الطاقوي المحلي لدى بعضها كفرنسا، الجدول التالي يوضح الدول الأكثر انتاجا للكهرباء النووية على الصعيد العالمي:

**الجدول رقم –1–**: أهم الدول المنتجة للطاقة الكهربائية من المصدر النووي سنة 2017

| الدولة | انتاج الكهرباء النووية (تيراواط ساعي) | الحصة من الإنتاج العالمي للكهرباء النووية (%) | الحصة من الإنتاج المحلي للكهرباء (%) |
|---|---|---|---|
| الولايات المتحدة الأمريكية | 830 | 32.3 | 19.3 |
| فرنسا | 437 | 17 | 77.6 |
| روسيا | 195 | 7.6 | 18.3 |
| الصين | 171 | 6.7 | 2.9 |
| كوريا | 165 | 6.4 | 30 |
| كندا | 101 | 3.9 | 15.1 |
| ألمانيا | 92 | 3.6 | 14.3 |
| أوكرانيا | 88 | 3.4 | 54.1 |
| بريطانيا | 70 | 2.7 | 20.9 |
| اسبانيا | 57 | 2.2 | 20.6 |
| باقي الدول | 365 | 14.2 | / |
| العالم | 2571 | 100 | / |

**المصدر:** تم اعداده بالاعتماد على احصائيات الوكالة الدولية للطاقة(IEA, 2017)

يتضح من الجدول التركيز الشديد لإنتاج الطاقة النووية على الصعيد العالمي، فالولايات المتحدة الأمريكية وفرنسا تستحوذان لوحدهما على حوالي نصف الإنتاج العالمي، وتستحوذ الدول العشرة الأولى الأكثر إنتاجا على أكثر من 85% من الإنتاج العالمي. يوضح الجدول أيضا أن فرنسا حالة خاصة تنفرد بين جميع دول العالم باحتلال انتاج الكهرباء من المصدر النووي لحصة تقارب 80% من الإنتاج المحلي للكهرباء، ويعود ذلك إلى شروع هذه الدولة مباشرة بعد الصدمة النفطية سنة 1973 في تطوير برنامج نووي يخفض تبعيتها للنفط. كما ترتفع هذه النسبة في أوكرانيا إلى أكثر من النصف، وهي الدولة التي وقعت فيها حادثة تشيرنوبيل سنة 1986 أيام الاتحاد السوفياتي السابق.

## 4- محددات المكانة المستقبلية للطاقة الكهربائية النووية ضمن المزيج الطاقوي العالمي

رغم أن حادثة فوكوشيما في اليابان سنة 2011 لم تضع حدا نهائيا لتطور انتاج الكهرباء من المصدر النووي على الصعيد العالمي، إلا أنها سوف تترك آثارا سلبية على اقتصاديات الطاقة النووية من حيث زيادة التكاليف المرافقة لإجراءات السلامة التي تضاف في كل مرة بهدف تبديد المخاوف. لكن مستقبل الطاقة النووية لا يتحدد فقط بناء على عنصري الخطر والتكلفة، بل تتحكم فيه مجموعة من العوامل الأخرى تختلف أهميتها من منطقة لأخرى، وهذا يفسر التفاوت في المواقف المعلنة حاليا بشأن التوجهات المستقبلية. ففي أوروبا مثلا قررت ألمانيا مباشرة بعد حادثة فوكوشيما توجهها نحو التخلي تدريجيا عن الطاقة النووية، بينما قررت بريطانيا مواصلة تطويرها مستقبلا، والأمر نفسه بالنسبة للصين والهند بهدف تلبية الطلب الهائل على الطاقة وتخفيض استهلاك الفحم الذي ألحق اضرارا بالغة بالبيئة. فيما يلي أهم العوامل التي من المنتظر أن تؤثر على مكانة الطاقة النووية في المستقبل ضمن المزيج الطاقوي العالمي:

### 4-1- تكلفة الكهرباء من المصدر النووي

يركز الخطاب المعارض للطاقة النووية في السنوات الأخيرة على الحجج الاقتصادية، وعلى رأسها كلفة انتاج الكهرباء ومدى توفر الموارد من اليورانيوم، بالإضافة إلى المسؤولية المدنية للمؤسسات المشغلة (Pellaud, 2012, p. 64). في الحقيقة تعتبر مسألة تكلفة الكهرباء النووية أمرا بالغ التعقيد ويكتسي أهمية كبيرة في الوقت نفسه، ذلك أن عمر المنشآت النووية يمتد لعقود، وبالتالي جزء كبير من التكلفة لا تتضح معالمه جيدا إلا عندما ينتهي العمر الإنتاجي للمفاعل الذي يتراوح تقريبا بين 30 و40 سنة، بعد أن يتم تفكيك المصنع واتخاذ الاحتياطات الكفيلة بعدم وجود تسربات اشعاعية.

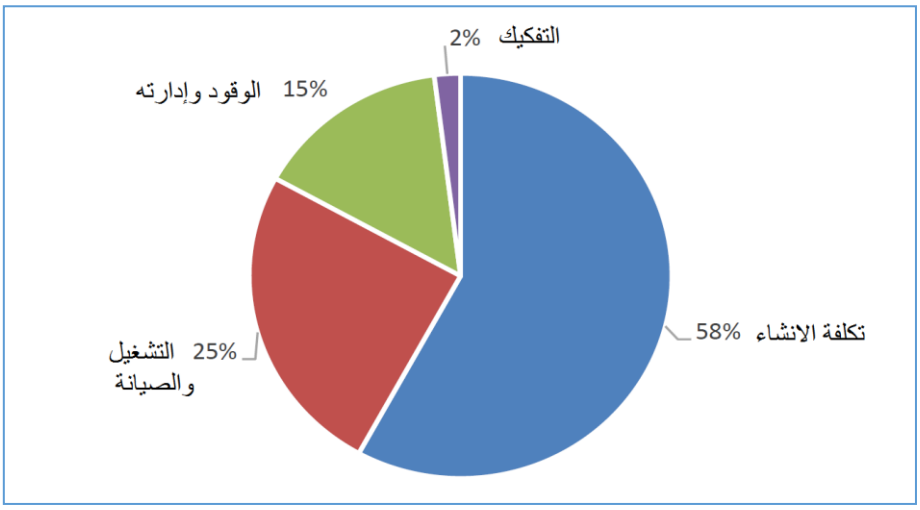
#### 4-1-1- مكونات التكلفة

تتكون تكاليف انتاج الكهرباء من المصدر النووي والتي تسمى أيضا بالتكاليف المباشرة من المكونات الرئيسية التالية:

- **تكلفة الإنشاء:** وهي التكلفة الفعلية للمصنع، وتضم مجموعة من التكاليف مثل الأرض المقام عليها والبنية التحتية المنجزة والأجور وتكاليف التمويل. تسمى تكلفة الإنشاء أيضا بتكلفة الليلة (Overnightcost)، وتعني التكاليف طبقا لأسعار يوم واحد إذا أقيم المصنع في ليلة واحدة. لأغراض المقارنة تحسب تكلفة الليلة من خلال حساب القيمة الحالية، وهي القيمة المساوية لسلسلة من التدفقات النقدية المستقبلية في الوقت الحاضر يتم خصمها بمعدل خصم محدد، وتعتبر تكلفة الانشاء التكلفة الأساسية للطاقة النووية، وتتراوح في أغلب المحطات التي تم إنشاؤها بين 1000 دولار و2000 دولار لكل كيلوواط ساعي مركب (OCDE, 2005, p. 43).

- **تكاليف التشغيل والصيانة:** ترتبط هذه التكاليف بالتشغيل اليومي للمصنع وصيانته، وتختلف بشكل كبير بين مختلف مناطق العالم بسبب التفاوت في الأجور وأسعار التجهيزات.
- **تكلفة الوقود:** وهي مجموع التكاليف المرتبطة بدورة الوقود النووي، مثل أسعار اليورانيوم وتكاليف النقل وتكاليف التحويل والتخصيب، بالإضافة إلى تكاليف إعادة سحب الوقود المستعمل والتخلص الآمن من النفايات الإشعاعية بعد سحب الوقود.
- **تفكيك المفاعل والتخزين طويل الأجل للنفايات:** وهي التكاليف المرتبطة بعملية إغلاق المصنع والتخزين طويل الأمد للنفايات النووية، هذه العملية لا يمكن معرفة تكلفتها الحقيقية إلا عند إغلاق المصنع نهائيا، لكن يتم تقديرها وتحميلها للمستهلك من خلال أسعار الكهرباء. الشكل التالي يوضح نسبة كل نوع من التكاليف الأساسية إلى التكلفة الاجمالية للكهرباء النووية:

**الشكل رقم –4–**: المكونات الأساسية لتكلفة الطاقة الكهربائية النووية:




**Source:** (O'Keefe, 2010, p. 160)

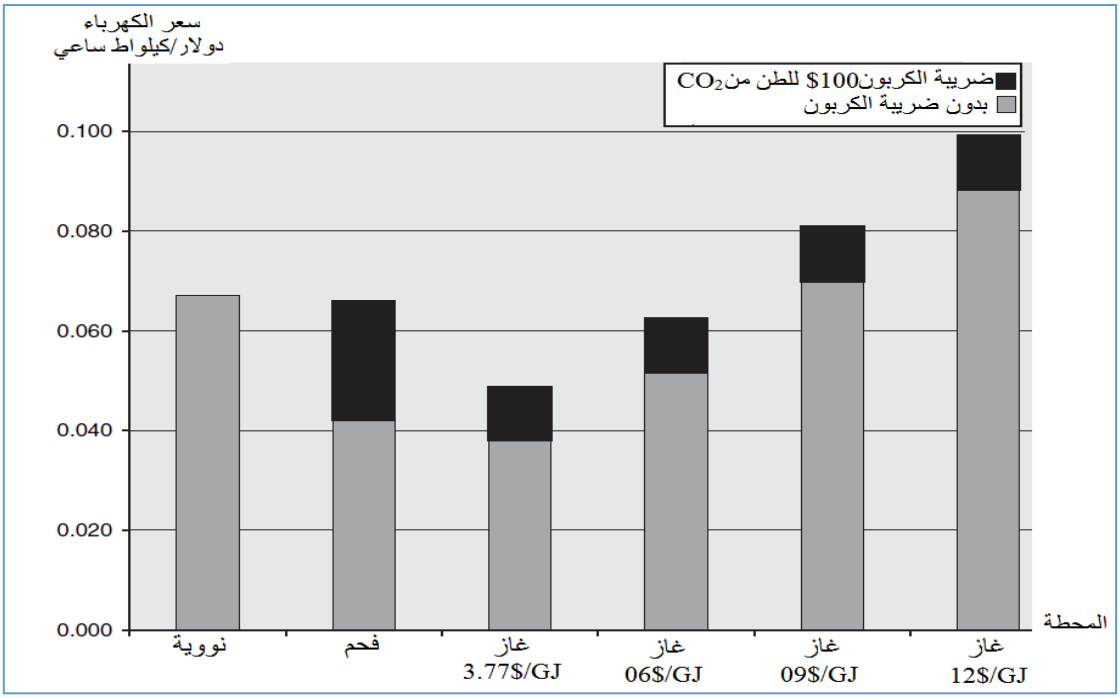
يتضح من الشكل أن التكلفة الأساسية للطاقة النووية هي تكلفة الإنشاء ثم تكلفة التشغيل والصيانة، أما تكلفة الوقود فهي بنسبة صغيرة في حدود 15% من مجموع التكاليف. تشمل تكلفة الوقود عدة تكاليف مثل سعر اليورانيوم ونقله وتخصيبه، ويعني هذا أن نسبة تكلفة شراء اليورانيوم إلى التكلفة الاجمالية للكهرباء النووية هي ضعيفة، وسبب ذلك هو كون اليورانيوم مادة عالية الكثافة الحرارية مقارنة بالفحم والغاز الطبيعي، وبالتالي فالكميات المطلوبة منه لتزويد المحطات الكهربائية أقل بكثير من كميات الفحم والغاز الطبيعي المطلوبة. كما أن كلفة إنشاء محطة نووية هي عادة أكبر من كلفة إنشاء محطة كهربائية تعمل على الفحم أو الغاز، ولهذا تتأثر كلفة الوحدة الكهربائية الواحدة المنتجة من المصدر

النووي بشكل أساسي بكلفة الإنشاء ولا تتأثر كثيرا بتغيرات أسعار اليورانيوم، عكس كلفة الوحدة الكهربائية المولدة من محطات الفحم أو الغاز.

### 4-1-2- مقارنة بين كلفة الكهرباء النووية وكلفة كهرباء محطات الفحم والغاز

في نهاية التسعينات وبداية الألفية أنجزت دراسات لمعرفة تكاليف الطاقة النووية ومقارنتها بتكاليف المحطات الكهربائية المنافسة والتي تعمل على الفحم والغاز خاصة في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية، ومن أهم الدراسات تلك التي أجراها مجموعة من الباحثين من اختصاصات متعددة على مستوى معهد ماساشوستس للتكنولوجيا (MIT) في الولايات المتحدة الأمريكية سنة 2003 مع بداية ارتفاع أسعار المحروقات. افترضت الدراسة 03 محطات لإنتاج الكهرباء، الأولى محطة نووية من نوع مفاعل الماء الخفيف (LWR)، والثانية محطة تعمل على الفحم المطحون (PF)، أما الثالثة فهي محطة غازية من نوع توربين غازي ذو دارة مركبة (CCGT)، وهي تكنولوجيا حديثة تستخدم إلى جانب التوربين البخاري المستعمل في المحطات الغازية التقليدية توربينا آخرا يعمل على الغاز بمردودية محسنة. كما افترضت الدراسة تكاليف إنشاء بقيمة 2000 دولار لكل كيلوواط ساعي مركب بالنسبة للمحطة النووية، 1300 دولار لكل كيلوواط ساعي مركب في محطة الفحم، و500 دولار لكل كيلوواط ساعي مركب في المحطة الغازية، وأسعار غاز تتراوح بين حوالي 04 دولار و12 دولار للجيغاجول ($01GJ = 26.14m^3$)، كما افترضت الدراسة أن كل المحطات سوف تشتغل بشكل عادي خلال 40 سنة. الشكل التالي يوضح أسعار الوحدة الكهربائية الواحدة التي توصلت إليها الدراسة:

**الشكل رقم-5-**: تقدير معهد ماساشوستس للتكنولوجيا (MIT) لتكاليف الكهرباء من مصادر مختلفة




**Source:** (Evans, 2007, p. 136)

إن سعر الوحدة الكهربائية من المصدر النووي في حدود 0.067 دولار للكيلوواط ساعي هو غير منافس لأسعار الكهرباء من محطة الفحم الذي كان في حدود 0.042 دولار للكيلوواط ساعي، ولا لأسعار الكهرباء المنتجة في محطة الغاز التي كانت في حدود 0.038 دولار للكيلوواط ساعي عندما تكون أسعار الغاز منخفضة إلى ما دون 04 دولار للجيغاجول، ويفسر هذا الأمر الاعتماد الكبير على المحطات الغازية في انتاج الكهرباء في أغلب مناطق العالم. لكن تكلفة انشاء محطات الفحم والغاز صغيرة نسبيا وتشغيلها يتطلب كمية كبيرة من الوقود الذي يؤثر سعره على سعر الكهرباء، بينما في المحطة النووية تكون تكلفة الانشاء مرتفعة لكن يتطلب التشغيل القليل من الوقود، حيث تشكل تكلفة شراء اليورانيوم حوالي 05% فقط من تكلفة الكهرباء المنتجة(OCDE, 2003, p. 64)، وهذا يجعل سعر الكهرباء من المحطات النووية يتأثر قليلا بتقلبات أسعار اليورانيوم، ويجعل المحطات النووية منافسا قويا للمحطات الغازية في حالة ارتفاع أسعار الغاز إلى 12 دولار للجيغاجول كما حدث في سنوات 2008 و 2011. كما يبين الشكل أن فرض ضريبة على الانبعاثات الغازية يجعل الكهرباء النووية منافسا اقتصاديا للكهرباء من الفحم والغاز بسبب كثرة انبعاثات الكربون في المحطات التي تعمل على الغاز والفحم، والتي يتزايد الاهتمام بها منذ بداية الألفية الثالثة.

### 4-2- أمان المحطات النووية وأثره على التكلفة

يعتبر أمان المحطات النووية أهم عامل يشغل بال أصحاب القرار والرأي العام ومشغلي المحطات النووية، وفي كل مرة يقع حادث نووي يحتدم الجدال حول المخاطر المصاحبة للصناعة النووية.

### 4-2-1- حوادث المفاعلات النووية

حتى الآن حدثت ثلاثة حوادث خطيرة اثناء تشغيل المحطات الكهربائية النووية،كان الخطأ والإهمال البشري حاسما في وقوعها أو تفاقمها، وأدت إلى وقوع اضرار في قلب المفاعل النووي أو ما يعبر عنه عادة بفقدان التبريد:

**أ- حادثة ثري ميل ايسلاند**

وقعت هذه الحادثة في محطة "ثري ميل ايسلاند" في بنسلفانيا بالولايات المتحدة الأمريكية سنة 1979 والتي كانت تشغلها شركة ميتروبوليتان إديسون (Metropolitan Edison)، حيث كان عمال الصيانة بصدد إجراء أعمال صيانة روتينية على وحدة تكثيف البخار دون الانتباه لترك بعض صمامات الاغلاق مغلقة، وهو مالم يمكن من ضخ مياه الطوارئ إلى المبرد الثانوي الذي فقد بفعل الحرارة، وبالتالي ارتفعت أيضا حرارة المبرد الاولي لعدم وجود المبرد الثانوي الذي يسحب الحرارة منه. أدى الحادث إلى انصهار جزئي في قلب المفاعل ولحسن الحظ لم يخلف خسائر بشرية، وكان له صدى شعبيا واعلاميا كبيرا، لكنه ساهم في احراز تقدم كبير فيما يخص السلامة التقنية للمفاعلات من خلال تعديل الأنظمة وتدريب المشغلين (Basdevant, 2012, p. 140).

**ب– حادثة تشيرنوبيل**

وقع الحادث الثاني وهو الأخطر على الإطلاق سنة 1986 في تشيرنوبيل بأوكرانيا في وقت الاتحاد السوفياتي السابق، وقد كان المفاعل من نوع (RMBK) الذي يستعمل الماء المغلي كمبرد والغرافيت كوسيط. خلال اجراء بعض اختبارات الأمان حدث خطأ بشري فادح، حيث تم استخدام عدد أقل من العدد الطبيعي لقضبان التحكم الواجب استعمالها والتي تعمل على تغيير شدة التفاعل أو إيقافه تماما، كما كان مصدر ماء التبريد لحالة الطوارئ غير مشغل، وأدى تزايد البخار وارتفاع الحرارة إلى تشقق قلب المفاعل واندلاع النار وتسرب الاشعاعات بسبب عدم وجود بناء اسمنتي سميك يحتوي وعاء قلب المفاعل، بالإضافة إلى وفاة 30 شخصا كنتيجة مباشرة للانفجار. ورغم تسرب الاشعاعات وتسببها في وفيات لاحقة إلا أن تقريرا أعدته الهيئة العلمية للأمم المتحدة سنة 2000 خلص إلى أن الأغلبية الكبيرة من السكان لا تحتاج إلى العيش في الخوف من العواقب الخطيرة لحادثة تشيرنوبيل. لقد كشفت حادثة تشيرنوبيل عن التصميم الرديء للمفاعل النووي والذي لم يخضع لأي مراجعة تقنية معمقة، بالإضافة إلى نقص التكوين لدى المشغلين، الشيء الذي أثر سلبا على أدائهم (Pellaud, 2012, pp. 24-25).

**ج– حادثة فوكوشيما**

وقعت هذه الحادثة في مارس 2011 في اعقاب زلزال التسونامي الذي ضرب اليابان في تلك الفترة ومس محطة فوكوشيما التي صممتها شركة جنيرال الكتريك (GE) وتديرها شركة طوكيو للطاقة الكهربائية (Tepco)، تتكون هذه المحطة من 06 مفاعلات من نوع الماء المغلي بقدرة اجمالية تقدر ب4.7جيغاواط كهربائي، ما يجعلها أحد أكبر المفاعلات النووية على الصعيد العالمي(Basdevant, 2012, pp. 151-152)، ورغم وقف التفاعلات الانشطارية آليا إلا أن الزلزال دمر مولدات الطوارئ الخاصة بمضخات التبريد، حيث توقفت بعد ساعات من العمل، كما تجاوزت الأمواج السور البحري للمحطة وتعطلت مولدات الديزل التي غمرتها المياه. أدى عدم إمكانية التبريد الى ارتفاع درجات الحرارة وانصهار قضبان الوقود وحدوث بعض الانفجارات، ولم يخلف الحادث وفيات مباشرة مرتبطة به.

لقد أصبح من الواضح أن حادثة فوكوشيما مرتبطة بشكل وثيق بأخطاء التسيير، فرغم الزلزال العنيف الذي بلغت قوته 09 درجات وأعقبه تسونامي بقوة هائلة، إلا أن المفاعلات توقفت كما كان مخططا له، مثبتة أن طريقة تصميم قلب المفاعل كانت وجيهة، والمشكلة التي حدثت هي عجز المسؤولين عن مواجهة مشكلة فقدان وسائل التبريد التي تبقى ضرورية لنزع الحرارة من الوقود المستعمل حتى بعد توقف المفاعلات (Bigot, 2011, pp. 126-127)،كما وجدت لجنة تحقيق مستقلة ان سبب الحادثة كان متوقعا بسبب الإهمال، فقد فشلت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية (Tepco) في تأمين متطلبات السلامة الأساسية مثل خطط الاخلاء والآثار المحتملة للزلازل، وهي عناصر من غير

الممكن على الاطلاق اهمالها في منطقة تعرف بكثرة الزلازل، وهنا يرجع بعض المحللين ضعف السلطات الرقابية في اليابان أيضا إلى الفساد وتداخل المصالح بين السلطات السياسية والإدارية والمؤسسات الصناعية في قطاع الكهرباء (Chevalier, 2012, pp. 60-61).

### 4-2-2- مقارنة المخاطر بين مختلف مصادر الطاقة

دائما ما تعتبر الطاقة النووية مرادفا للخطر، لكن الحقيقة هي أن هذا المصدر لا ينفرد لوحده بوجود المخاطر، ففي كل سنة يموت في كل ارجاء العالم حوالي 5000 قاصر في مناجم الفحم التي لا تستجيب لمتطلبات السلامة خاصة في الدول النامية كالصين والهند. أما فيما يخص الطاقة المائية، فقد تسبب إعصار النينو في انهيار سد بانكياو في الصين سنة 1975مخلفا حوالي 30000 قتيل فقدوا مباشرة اثناء الحادث، وفي الفيليبين هلك 4386 شخص سنة 1987 بعد اصطدام عبّارة بحرية مع ناقلة نفط، كما انفجرت سنة 2010في عرض البحر في خليج المكسيك منصة ديب ووتر هوريزن (Deepwater Horizon) التابعة لشركة بريتش بتروليوم مخلفة 11 قتيلا وتسرب 5.5 مليون برميل من النفط، وتعتبر الحادثة أسوأ تلوث نفطي في التاريخ (Chevalier, 2012, pp. 46-47).

في دراسة لمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OCDE, 2010)، تم إحصاء عدد الحوادث الخطيرة حسب مختلف مصادر الطاقة التالية: الطاقة الأحفورية (المحروقات)، الطاقة المائية، والطاقة النووية على الصعيد العالمي، حيث قدمت الدراسة جردا للنتائج مصنفا بشكل منفصل بين الدول التي تنتمي للمنظمة وتلك التي لا تنتمي إليها، الجدول التالي يوضح إحصاء للحوادث الخطيرة (أكبر من 05 وفيات) المرتبطة بالمحروقات، الطاقة المائية، والطاقة النووية على الصعيد العالمي بين 1969 و2000:

**الجدول رقم -2-**: ملخص للحوادث الخطيرة المرتبطة بمصادر مختلفة للطاقة بين 1969 و2000

| | دول مجموع الOCDE | | | دول خارج مجموعة الOCDE | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| المصدر الطاقوي | الحوادث | عدد القتلى | عدد القتلى لكل جيغاواط كهربائي منتج سنويا | الحوادث | القتلى | عدد القتلى لكل جيغاواط كهربائي منتج سنويا |
| الفحم | 75 | 2259 | 0.157 | 1044 | 18017 | 0.597 |
| النفط | 165 | 3713 | 0.132 | 232 | 16505 | 0.897 |
| الغاز الطبيعي | 90 | 1043 | 0.085 | 45 | 1000 | 0.111 |
| غاز البترول المميع | 59 | 1905 | 1.957 | 46 | 2016 | 14.896 |
| الطاقة المائية | 01 | 14 | 0.003 | 10 | 29924 | 10.285 |
| الطاقة النووية | 00 | 00 | 00 | 01 | 31 (مباشر) | 0.048 |
| **المجموع** | **390** | **8934** | / | **1480** | **72324** | / |

**Source**: (OCDE, 2010, p. 36)

من الجدول يمكن اجراء مقارنة من خلال عدد الحوادث أو عدد القتلى، كما يمكن اجراء مقارنة نسبية من خلال عدد الوفيات مقابل كل جيغاواط كهربائي يتم انتاجه خلال السنة، وفي كل الحالات يتضح أن عدد الضحايا في دول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية التي تضم في معظمها دولا صناعية أقل بكثير من ذلك الخاص بالدول النامية مهما كان مصدر الطاقة المستعمل. يعني هذا أن الحوادث في قطاع الطاقة ترتبط بشكل أساسي بدرجة التطور ومدى احترام قواعد السلامة، كما يمكن الملاحظة في كلا المجموعتين أن الغاز الطبيعي والطاقة النووية هما الأقل تسببا في الوفيات.

لكن تجدر الإشارة إلى ان الوفيات المرتبطة بالطاقة النووية هي مرتبطة مباشرة بلحظة وقوع الحادث، وهي بالضبط مجموع الوفيات التي حدثت اثناء انفجار المفاعل النووي في تشيرنوبيل سنة 1986، ومن الصعب معرفة عدد الضحايا الذين سوف يتأثرون بطريقة غير مباشرة خلال السنوات التي تلي الحادثة، لكن الخبراء يقدرون ذلك بين 9000 و33000 ضحية إضافية خلال الـ 60 سنة التي تلي وهذا حسب اختلاف المعاملات المستعملة في تقدير جرعة الاشعاع. لكن حتى في هذه الحالة يبقى ضحايا الحوادث النووية اقل بكثير من ضحايا المحروقات، لأن الخبراء يؤكدون أيضا أن التلوث البيئي الناتج عن الوقود الاحفوري تسبب خلال سنة 2000 فقط بوفاة 960000شخص في كل ارجاء العالم بسبب الجزيئات الصغيرة في الهواء والأقل من 10 ميكرون (Chevalier, 2012, pp. 48-49)، والأمر نفسه عند مقارنة الحوادث النووية مع حوادث السيارات والطائرات التي تقتل آلاف الأشخاص سنويا، لكن القليل من الأشخاص فقط من يرغبون في التخلي عن السيارات والطائرات (Eerkens, 2006, p. 26).

### 4-2-3- تأثير متطلبات أمان المحطات النووية على التكلفة

يتعين في المستقبل على الدول التي تستغل الطاقة النووية أن تستجيب لانشغالات الرأي العام، وهذا من خلال تعزيز معايير السلامة خاصة وأن الحوادث النووية على قلتها كانت مرتبطة بشكل وثيق بالخطأ والإهمال البشري. إن تسيير المخاطر في قطاع الطاقة يجب أن يكون مرتبطا بشكل وثيق بتوفر الشرطين التاليين:

- وجود هيئات محلية تحدد إجراءات السلامة وتسهر على تطبيقها تتمتع بالاستقلالية التامة والكفاءة والشفافية، وهذه المعايير هي التي تحدد مدى ثقة الرأي العام في الهيئات الرقابية، فقد كشفت حادثة فوكوشيما عن هشاشة السلطات الرقابية في مجال السلامة النووية في هذا البلد من خلال الفشل في تبريد المفاعل بعد توقفه كما هو مخطط له.
- إن معايير السلامة يجب أن تكون قبل أي معيار اقتصادي آخر، وتعزيزها في المستقبل يعني الاستثمار أكثر في مجال السلامة، ولهذا فالسيناريو المتوقع في المستقبل هو مزيد من الارتفاع في تكلفة الكهرباء من المصدر النووي.

### 4-3- السياسات البيئية وأثرها على تنافسية الطاقة النووية

منذ بداية الالفية الثالثة زاد الاهتمام العالمي بالتأثيرات البيئية لنموذج الاستهلاك الطاقوي العالمي خاصة بقيادة الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ(IPCC)، حيث أصبح هناك قليل من الشك في أن استهلاك الوقود الاحفوري يعمل على زيادة حرارة الأرض من خلال زيادة تركيز غازات الدفيئة في الجو، ويحظى غاز ثاني أكسيد الكربون (CO2) بالاهتمام الأكبر على الصعيد العالمي بسبب وجوده بكمية كبيرة في الجو، وانبعاثه بكميات أكبر بكثير من الغازات الأخرى أثناء إحراق الوقود الأحفوري.

لكن كما هو الحال بالنسبة للمخاطر الطاقوية، لا يوجد مصدر طاقوي بدون تأثيرات بيئية، لكن ذلك يكون بدرجات متفاوتة، ومن أجل المقارنة يجب دائما أخذ بعين الاعتبار التأثيرات البيئية لكل المصادر. يمكن أن يكون الاحتباس الحراري الخطر الأكبر الذي يهدد البشرية والمتهم الرئيسي في هذه الحالة هو الوقود الاحفوري، في حين أن الطاقة النووية لا تصدر غازات الدفيئة بشكل ملحوظ (O'Keefe, 2010, p. 139).لكن الطاقة النووية تطرح مشكلة تخزين النفايات النووية خلال الأجل الطويل، والأمر كذلك بالنسبة للطاقات المتجددة التي لا تؤدي إلى انبعاثات غازية إلا أنها تؤثر على الطبيعة. ففي ألمانيا مثلا يمكن أن يؤدي التراجع عن استغلال الطاقة النووية بعد حادثة فوكوشيما إلى مواجهة الرأي العام في قضية أخرى، حيث تخطط هذه الدولة لإنشاء مشاريع للطاقة الريحية البحرية بقدرة 25000 ميغاواط في حدود سنوات2025-2030، وسوف يتعين عليها انشاء حوالي 4500كم من خطوط نقل الكهرباء ذات الضغط العالي جدا بهدف نقل الكهرباء من شمال البلاد إلى جنوبها (Chevalier, 2012, p. 73).

حتى الآن لا يتم إدراج التكاليف البيئية والتي تسمى بالتكاليف الخارجية في كلفة الكهرباء، ولا يمكن إجراء تقدير كمي للآثار البيئية لمختلف مصادر الطاقة بدقة عالية، لكن تم اجراء دراسات في هذا الصدد في الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد الأوروبي منذ نهاية القرن الماضي (Nifenecker, 2011, p. 107). الجدول التالي يوضح تأثير التكاليف الخارجية على كلفة الوحدة الكهربائية حسب برنامج الاتحاد الأوروبي لتقدير التكاليف الخارجية لمصادر الطاقة (ExternE):

**الجدول رقم–3–**: تقدير تأثير التكاليف الخارجية على كلفة وحدة الكهرباء حسب برنامج ExternE

| المصدر الطاقوي | التكاليف الخارجية (يورو/ميغاواط ساعي) |
|---|---|
| الفحم | 150-40 |
| النفط | 110-30 |
| الغاز | 40-10 |
| الطاقة النووية | 7-3 |
| الكتلة الحيوية | 30-2 |
| الطاقة الكهرومائية | 10-1 |
| الطاقة الريحية | 2.5-0.5 |
| الطاقة الفوطوفولطية | 6 |

**Source :** (Nifenecker, 2011, p. 110)

يتضح من الجدول أن الطاقة النووية والطاقة المتجددة هي أقل مصادر الطاقة إضرارا بالبيئة، وادراج التكاليف البيئية في حساب تكلفة الكهرباء يجعل الكهرباء من هذه المصادر أكثر تنافسية مقارنة بالمحطات الكهربائية التي تعمل على المحروقات، يمكن ادراج الأثر البيئي في حساب التكاليف خاصة من خلال طريقتين:

- تعميم استعمال تجهيزات حجز وتخزين الكربون في المحطات الحرارية التي تعمل على الوقود الاحفوري خاصة محطات الفحم مثل محطة GICC في ألمانيا، وهي حتى الآن لا تزال تكنلوجيا مرتفعة السعر وبإمكانها رفع تكاليف انشاء المحطات وأسعار الكهرباء من المحروقات بشكل كبير.
- تعميم فرض ضرائب على الانبعاثات الغازية من المحطات الكهربائية، وفي هذا الصدد تعتبر السويد رائدة في هذا المجال من خلال فرض هذا النوع من الضرائب منذ بداية التسعينات، وقد مكنت الدولة من تحقيق إيرادات مالية مهمة استعملت في تخفيف الأعباء الاجتماعية والضريبة على الدخل (Chevalier, 2012, p. 143).

### 4–4– مدى تطور الطاقات المتجددة

رغم التطور الكبير للطاقات المتجددة على الصعيد العالمي في السنوات الأخيرة، إلا أنها لا تزال تلبي حوالي 10% فقط من الطلب العالمي على مصادر الطاقة كما يوضحه الشكل رقم –2–، وهذا رغم تضاعف الاستثمارات العالمية في هذا القطاع، والتي انتقلت من حوالي 112 مليار دولار سنة 2006 لتتجاوز 200 مليار دولار سنويا بين 2010 و2016، وسجلت رقما قياسيا سنة 2015 بحوالي 312 مليار دولار (REN21, 2017, p. 186). يعود

ضعف مساهمة الطاقة المتجددة إلى ارتفاع تكلفتها مقارنة بالمحروقات من جهة، وضعف الطاقة الابتدائية للطاقة المتجددة غير المائية من جهة أخرى، فحسب المجلة الإحصائية لبريتش بتروليوم(British Petroleum, 2018)، بلغ الاستهلاك العالمي منها 487مليون طن معادل للنفط سنة 2017، وهو ما يشكل حوالي 03.6% فقط من مجموع الاستهلاك الطاقوي العالمي خلال السنة نفسها.

لا يمكن تطوير الطاقة المتجددة المائية بشكل كبير في المستقبل لأسباب جغرافية، أما الطاقة المتجددة غير المائية فسوف تستمر في التطور مع زيادة الاستثمارات، خاصة مع الاتجاه التصاعدي لأسعار المحروقات وميل تكاليف الطاقة المتجددة غير المائية إلى الانخفاض. لكن ضعف السعة الابتدائية للطاقة المتجددة يجعلها لا تتمكن من تعويض الوقود الاحفوري مستقبلا بشكل كبير والذي يستحوذ حاليا على 85% من الاستهلاك العالمي من الطاقة، كما أن الطاقة الريحية والشمسية تتميز بالانقطاع، ويستدعي تطويرها توفير أنظمة طاقوية احتياطية تعمل على الوقود الاحفوري مثل محطات الفحم والغاز، بالإضافة إلى محطات انتاج الكهرباء من المصدر النووي.

### 4-5- حل مشكلة التخزين طويل الأجل للنفايات النووية

يعتبر اليورانيوم وقودا عالي الكثافة الحرارية ويستغل بكميات قليلة جدا على مستوى المحطات الكهربائية النووية، وهذا ما يجعل كمية النفايات التي تصدرها المحطات النووية قليلة أيضا لكنها خطيرة بسبب احتوائها على جزيئات مشعة بدرجات متفاوتة، تعمل هذه الجزيئات على اصدار اشعاعات خطيرة لفترات زمنية قد تمتد لملايين السنين.

حتى الآن يتم تخزين النفايات عادة على مستوى كل محطة نووية بسبب صغر حجمها من خلال الحرق أو الدفن أو التزجيج عبر تبخير الماء وتغليف المادة الصلبة داخل زجاج خاص. يبلغ حجم السائل الذي يحتوي نواتج الانشطار وينتجه مفاعل بقدرة 900 ميغاواط كهربائي خلال سنة واحدة حوالي 20م$^3$، وفي محطة الهاغ بفرنسا (La Hague) يصبح حجم هذه النفايات بعد التزجيج حوالي 2م$^3$(Basdevant, 2012, p. 121). لكن المطلوب هو إيجاد طريقة للتحزين طويل الأجل، وفي هذا الصدد اقترحت عدة طرق، لكن التوجه الحالي يبدو لصالح التخزين الجيولوجي من خلال تخزين النفايات داخل صناديق معدنية محكمة مصنوعة من النحاس أو الصلب الذي لا يصدأ، ثم دفنها في عمق يتراوح بين 500م و1000م في الطبقات الصخرية أو الطينية أو الملحية (O'Keefe, 2010, p. 163)، ويعتبر مستودع أولكيليتو (Olkiluoto) في جبل أوراجوكي في فنلندا ومستودع يوكا (Yucca) في صحراء نيفادا في الولايات المتحدة الأمريكية اشهر المستودعات التي يرتقب تدشينها في السنوات المقبلة. لكن المشكلة الرئيسية لهذه الطريقة هي إيجاد مناطق مستقرة جيولوجيا خلال فترات زمنية طويلة، وهو ما لا يمكن توفره في العديد من مناطق العالم، كما أن تكاليف

انشاء المستودعات وعملية التخزين سوف تضاف إلى اقتصاديات الطاقة النووية وبالتالي تعمل على زيادة كلفة الكهرباء من المصدر النووي.

### 4-6- التطور التكنلوجي ووفرة الموارد

يركز الكثير من معارضي الطاقة النووية على مسألة ندرة اليورانيوم كعامل حاسم يحد من تطوير الطاقة النووية في المستقبل(Pellaud, 2012, p. 64)، لكن مسالة نقص الموارد تخص أيضا النفط وباقي المصادر الأحفورية للطاقة، كما أن كمية هذه الموارد تتغير باستمرار لأنها ترتبط بعدة عوامل كالتطور التكنلوجي ولا تعتمد على العنصر الجيولوجي فقط. في آخر إصدارها من "الكتاب الأحمر"، قدرت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA, 2016) الاحتياطات المعروفة من اليورانيوم والقابلة للاستخراج بتكاليف معقولة بـ 5.7 مليون طن سنة 2015، وهي التي تكفي لأكثر من 100 سنة أخرى حسب احتياجات المفاعلات النووية خلال السنة نفسها والبالغة حوالي 56 ألف طن من اليورانيوم على الصعيد العالمي، وتزداد هذه الاحتياطات بإضافة تلك القابلة للاستخراج بتكلفة أعلى ويتوقع لها أن تنمو في المستقبل، يعني هذا أنه ليست هناك أزمة نقص في اليورانيوم.

يمكن للمفاعلات المولدة السريعة أن تطيل عمر الاحتياطات من اليورانيوم بمئات المرات، وإذا تم انشاء العديد من المفاعلات المولدة يمكن لليورانيوم والثوريوم أن يزود العالم بالكهرباء والوقود التركيبي لحوالي 1500 سنة بدلا من النفط والفحم والغاز (Eerkens, 2006, p. 20)، لأن هذه المفاعلات تنتج من الوقود أكثر مما تستهلك من خلال اعادة تدوير نفايات اليورانيوم المستعمل لاستخراج أنواع أخرى من الوقود. كما ينتظر من مفاعلات الجيل الرابع أن تقدم مزايا كثيرة من حيث الكفاءة والأمان وتخفيض تكاليف التشغيل واطالة عمر احتياطات اليورانيوم، هذه المفاعلات لا تزال قيد التصميم والتطوير في إطار "المنتدى الدولي للجيل الرابع" الذي تم اطلاقه بمبادرة من وزارة الطاقة الامريكية سنة 2000، ويضم مجموعة من الدول الصناعية التي سبق لها وأن طورت برامج كبيرة للطاقة النووية (Naudet & Reuss, 2008, p. 294)، هذه المفاعلات في أغلبها سريعة وتشكل قطيعة تكنلوجية مع الأنواع السابقة.

### 4-7- التطورات المستقبلية في أسعار المحروقات

تصبح الكهرباء النووية تنافسية كلما ارتفعت أسعار المحروقات، ومنذ بداية الألفية الثالثة عرفت هذه الأسعار ارتفاعا كبيرا مقارنة بتلك التي سادت قبل حلولها بسبب الارتفاع الكبير للطلب العالمي على مصادر الطاقة، ووصلت إلى مستويات قياسية سنة 2008 قبل أن تنهار في أعقاب الأزمة المالية العالمية سنة 2009، وعادت للارتفاع الكبير سنة 2011 قبل أن تنهار مجددا سنة 2015 بسبب زيادة الإنتاج خاصة في الولايات المتحدة الأمريكية والسعودية وإيران والعراق. لكن إذا أخذنا حيزا زمنيا طويلا نجد أن أسعار المحروقات كانت دائما ذات اتجاه تصاعدي، فرغم ارتفاع أسعار

النفط مثلا في نهاية السبعينات وانهيارها منتصف الثمانينات بشكل كبير، إلا أنه خلال الفترة بين 1970 و2008 نجد أن أسعار "خام تكساس الوسيط-WTI" والمستعمل كأحد أهم القياسات لتسعير الخامات الأخرى قد ارتفعت بمعدل قدره 04% سنويا (Hansen & Percebois , 2010, p. 190).

ورغم صعوبة التنبؤ في المستقبل بأسعار المحروقات بسبب تداخل مجموعة من العوامل المختلفة، إلا أنها من المرجح أن تستمر في منحاها التصاعدي خلال الأجل الطويل، رغم أن هذا الارتفاع يمكن أن تتخلله انخفاضات ظرفية ناجمة عن صدمات قد تمس الاقتصاد العالمي، ويعود هذا الارتفاع المحتمل إلى العوامل التالية:

- استمرار ارتفاع الطلب العالمي على مختلف مصادر الطاقة خلال العقود القادمة خاصة بفعل زيادة عدد سكان العالم وتغير نمط المعيشة في العديد من الدول الناشئة والنامية، وفي هذا الصدد تتوقع وكالة الطاقة الدولية أن يرتفع عدد سكان العالم من 7.3 مليار نسمة سنة 2014 إلى 9.2 مليار نسمة سنة 2040، وارتفاع الطلب العالمي على الطاقة الأولية إلى 17.8 مليار طن معادل للنفط خلال السنة نفسها (IEA, 2016, p. 44 et 61).
- الأماكن المحتملة لتطوير وزيادة انتاج النفط والغاز بهدف تلبية الطلب العالمي المتزايد تتواجد في مناطق أكثر صعوبة وتتطلب تكاليف أكبر في مجال الاستكشاف والإنتاج والتدابير اللازمة لحماية البيئة، مثل المناطق البحرية، الأماكن العميقة، الرمال الاسفلتية، المناطق القطبية، النفط والغاز الصخريين، بالإضافة إلى التوترات الجيوسياسية المستمرة في الشرق الأوسط والتي تضغط على الاستثمارات في مجال الاستكشاف والإنتاج في هذه المنطقة المهمة.
- رغم أن تكاليف استخراج الفحم تعرف تغيرا طفيفا مقارنة مع النفط والغاز، إلا أن التجارة العالمية لهذه المادة يتحكم فيها عدد قليل من المتعاملين، وهو ما يجعل أسعاره هو الآخر تسلك منحى تصاعديا على غرار باقي المحروقات (Chevalier, 2012, p. 90)، كما أنه أكثر أنواع الوقود الاحفوري تلويثا للبيئة، وبالتالي يمكن أن تؤدي السياسات البيئية في المستقبل إلى رفع تكاليف انتاج الكهرباء من الفحم بشكل كبير أو إلى استبداله بالغاز الطبيعي او الطاقة النووية كمصدر لإنتاج الكهرباء.

### 4-8- ضغوطات مناهضي الطاقة النووية

بعد أن كانت الطاقة النووية مُرحبا بها في الخمسينات كمصدر للكهرباء منخفضة التكلفة، تطورت الحركات المناهضة لها سواء كانت لأغراض عسكرية أو سلمية منذ السبعينات خاصة في أوروبا وأمريكا واليابان، وينتظم مناهضو الطاقة النووية في تجمعات مختلفة خاصة الأحزاب السياسية والنقابات والمنظمات غير الحكومية والحركات البيئية، بعضها ينشط على الصعيد المحلي بينما ينشط بعضها الآخر على الصعيد العالمي على غرار منظمة السلام الأخضر (Greenpeace) والصندوق العالمي للطبيعة (WWF) ومنظمة أصدقاء الطبيعية (FOEI). يركز مناهضو الطاقة

النووية في شقها السلمي المتعلق بإنتاج الكهرباء على ضرورة تطوير الطاقات المتجددة وسياسات الفعالية الطاقوية بهدف استبعاد الخيار النووي الذي يمكن أن تنجر عنه مشاكل التلوث الاشعاعي والانتشار النووي، وساهمت احتجاجاتهم في الدفع نحو التخلي عن الخيار النووي في بعض الدول خاصة ألمانيا وسويسرا وإيطاليا.

لكن مع بداية الالفية الثالثة وزيادة الاهتمام العالمي بمشكلة التغيرات المناخية، احتدم النقاش بين مناهضي الطاقة النووية ومؤيديها، حيث يركز المؤيدون على أن هذا المصدر لا يطلق غازات الاحتباس الحراري الذي يمكن أن يكون المشكلة الأكبر التي تواجهها البشرية في القرن الواحد والعشرين، ويعقدون آمالهم على طبيعة التكنولوجيات والمفاعلات المستقبلية. في الحقيقة يعتبر الجدال في عصرنا الحالي في مجال الطاقة النووية محتدما إلى حد غير مسبوق، وقائمة الحجج المعارضة للخيار النووي أو تلك المؤيدة له يمكن تمديدها بشكل لانهائي، حتى أن أحد اهم العلماء و الناشطين البيئيين في بريطانيا وهو جيمس لوفلوك (James Lovelock)، تحول بشكل غير متوقع إلى دعم الطاقة النووية باعتبارها خطرا أصغر مقارنة بخطر الاحتباس الحراري الذي تعتبر عواقبه المحتملة على الأرض والبشرية وخيمة (Battiau, 2008, p. 133) ، في تحول يعكس مدى حجم الجدال الذي سوف يبقى يخص الطاقة النووية خلال العقود القادمة، وهو ما يجعل الدور المستقبلي لها يختلف بشكل كبير من دولة لأخرى، لأنه يتعلق بالمفاضلة بين مختلف المخاطر التي يمكن لكل مجتمع تحملها. فقد قررت بريطانيا رغم احتجاجات مناهضي الطاقة النووية مواصلة انشاء المفاعلات النووية بعد حادثة فوكوشيما بهدف تقليص الانبعاثات الغازية المسببة للاحتباس الحراري، كما قررت الصين انشاء عدة مفاعلات بعد الحادثة لمواجهة الطلب الكبير على الطاقة وتخفيض استهلاك الفحم، أما اللجنة الأوروبية فقد طرحت سنة 2013 توصيات تهدف لتعزيز السلامة المشتركة في المفاعلات النووية في كل دول الاتحاد الأوروبي التي تواصل استغلال الطاقة النووية (Chevalier, 2013, p. 61)، ويعني هذا أن دور التجمعات والمنظمات المناهضة للطاقة النووية سوف يكون له بكل تأكيد دور كبير في التأثير على مستقبل هذه الطاقة حتى في الدول التي تقرر مواصلة هذا الخيار، من خلال دفع الحكومات والمتعاملين لزيادة متطلبات الأمان في المفاعلات المستقبلية.

## 5– نتائج الدراسة

يمكن تلخيص نتائج الدراسة فيما يلي، وهي تؤكد صحة الفرضيات الموضوعة:

- لا يمكن التخلي عن الخيار النووي في المستقبل على الصعيد العالمي، لأن ذلك يختلف من دولة لأخرى ويرتبط بالمفاضلة بين المخاطر حسب درجتها وبطبيعة المخاطر التي يمكن لمجتمع معين تحملها، ولا يوجد مصدر يخلو منها. كما أن الطاقة المتجددة تبقى عاجزة عن تلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة.

- تتحدد المكانة المستقبلية للطاقة النووية بمجموعة من العوامل أهمها سلامة المنشآت النووية، كلفة الكهرباء النووية، مدى تطور الطاقات المتجددة، والسياسات البيئية التي تهدف للحد من استهلاك الوقود الاحفوري.
- الكهرباء النووية منخفضة التكلفة أصبحت جزءا من الماضي، حيث أصبح من الضروري تعزيز إجراءات السلامة حتى لو كان غرضها سياسيا وليس تقنيا بهدف تبديد مخاوف الرأي العام المحلي والدولي.
- رغم ارتفاع التكاليف في المحطات النووية في المستقبل، تصبح الطاقة النووية منافسة للوقود الاحفوري في حالة ارتفاع أسعار المحروقات بشكل كبير لأن سعر الكهرباء النووية لا يتأثر كثيرا بتغيرات أسعار اليورانيوم.
- تصبح الطاقة النووية أكثر تنافسية كلما زاد ادراج التكاليف الخارجية في حساب تكلفة الكهرباء من مصادر طاقوية مختلفة، بهدف مواجهة التأثيرات البيئية والتغير المناخي الناتج عن نموذج الاستهلاك الطاقوي الحالي.

**خاتمة**

حتى الآن لا يزال مستقبل انتاج الكهرباء من المصدر النووي على الصعيد العالمي غامضا منذ حادثة فوكوشيما في اليابان سنة 2011. فبينما حسمت بعض الدول كألمانيا في هذا الخيار من خلال التخلي عن الكهرباء النووية وتعريض نفسها لتحديات أخرى مثل التوسع في استهلاك الوقود الاحفوري، تجد دول أخرى كالصين والهند نفسها مجبرة على توليد الكهرباء نوويا بسبب الطلب المحلي الكبير على الطاقة، وتحاول دول أخرى تنويع المزيج الطاقوي بما فيها استغلال الطاقة النووية لتقليل تركيز المخاطر التي تتوزع على جميع أشكال الطاقة. لكن الكهرباء النووية سوف تكون مرتفعة الثمن في المستقبل ولن تكون تنافسية إلا مع ارتفاع أسعار المحروقات. أما في حالة تبني سياسات بيئية عالمية أو محلية لمواجهة خطر التغير المناخي، فسوف تكون للطاقة النووية مكانة معتبرة ضمن المزيج الطاقوي العالمي إلى جانب الطاقات المتجددة.

**المراجع:**

- **المراجع العربية**

- لودوفيك مون. (2014). *الطاقة النفطية والطاقة النووية*. (مالك عبود، المترجمون) الرياض: مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية.

- **المراجع الأجنبية**

- Basdevant, J.-L. (2012). *maîtriser le nucléaire : sortir du nucléaire après Fukushima.* Paris: Eyrolles.
- Bigot, B. (2011). l'énergie nucléaire après Fukushima. *Futuribles: analyse et prospective*(376), pp. 123-128.Paris: Groupe futuribles.
- British Petroleum. (2018). *BP statistical review of world energy.* Retrieved 09 19, 2018, from www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/xlsx/energy-economics/statistical- review/bp-stats-review-2018-all-data.xlsx

- Chevalier, J.-M. (2012). *l'avenir énergétique : cartes sur table.* Gallimard .
- Chevalier, J.-M. (2013). *Transition énergétique : les vrais choix.*Paris: Odile Jacob.
- Eerkens, J. W. (2006). *The Nuclear Imperative: A Critical Look at the Approaching energy crisis.* Netherlands: Springer.
- Evans, R. (2007). *fueling our future: an introduction to sustainable energy.*Cambridge: Cambridge university press.
- Hansen, J.-p., & Percebois , J. (2010). *Energie : économie et politique.* Bruxelles: Groupe de boeck.
- IAEA. .(2016) *Uranium 2016: Resources, Production and Demand.*Paris: OECD Publishing .
- IEA. (2016). *World energy outlook.* Paris: IEA publications.
- IEA. (2017). *key world energy statistics.* Retrieved 08 20, 2018, from www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf
- Michel Battiau. .(2008) *L'énergie : un enjeu pour les sociétés et les territoires.*Paris: Editions ellipes.
- Naudet, G., & Reuss, P. (2008). *Énergie, électricité et nucléaire.* Paris: EDP sciences.
- Nifenecker, H. (2011). *le nucléaire : un choix raisonnable* .Paris: EDP sciences.
- O'Keefe, P. (2010). *The future of energy use.*London: Earthscan.
- OCDE. (2003). *l'énergie nucléaire aujourd'hui.* Paris: Editions de l'OCDE.
- OCDE. .(2005) *Coûts prévisionnels de production de l'électricité.*Paris: Editions de l'OCDE.
- OCDE. .(2010) *Évaluation de risques d'accidents nucléaires comparés à ceux d'autres filières énergétiques.*Paris: Editions de l'OCDE.
- Pellaud, B. (2012). *Nucléaires : relançons le débat.* Lausanne: Éditions Favre SA.
- REN21. (2017). *Renewables global status report.* Retrieved 09 05, 2018, from http://www.ren21.net