



## NOTE D'ANALYSE

# Étude ADEME « Vers un mix électrique 100 % renouvelable »

---

Association négaWatt - Le 16 avril 2015

Suite à la publication de l'étude de l'ADEME « Vers un mix électrique 100 % renouvelable », l'Association négaWatt a souhaité faire une première analyse comparative entre le scénario négaWatt 2011 et trois des variantes proposées par l'ADEME, afin de confronter les puissances installées d'énergies renouvelables et les moyens de pilotage nécessaires.

Cette première note porte principalement sur les éléments techniques liés à l'offre d'électricité, et pourra être complétée ultérieurement par des éléments plus détaillés concernant la demande d'électricité ou les aspects économiques des différentes sources d'énergie renouvelable. Elle pourra également être revue et mise à jour lors de la publication de la version finale de l'étude ADEME, envisagée pour cet automne.

### Comparaison de 4 mix

---

Les quatre mix électriques comparés dans cette note sont les suivants :

1. [négaWatt 2011] : mix électrique dans le scénario négaWatt publié fin 2011, mis à jour début 2013 à l'occasion du débat national sur la transition énergétique.
2. [ADEME Ref] : mix de production électrique étudié par l'ADEME, avec 100 % d'énergies renouvelables ; mix dit de "Référence".
3. [ADEME Accept] : mix étudié par l'ADEME avec 100 % d'énergies renouvelables, dit à "Acceptabilité modérée". Cette dénomination peut prêter à confusion : il faut entendre "mix incluant des modifications par rapport au scénario de référence dans le cas où l'acceptabilité de celui-ci serait modérée".
4. [ADEME 40 % EnR + 55 % nucl] : mix de production électrique étudié par l'ADEME avec 40 % d'énergies renouvelables et 55 % de nucléaire.

## Scénario ou mix ?

---

Pour les variantes étudiées par l'ADEME, il est inexact de parler de "scénario", puisqu'il s'agit d'analyses de la faisabilité de fournir 100 % de l'électricité par des énergies renouvelables en 2050, et non d'une analyse de la trajectoire année par année pour atteindre ce taux de 100 %. Ce sont donc des mix électriques à une année donnée (2050) et non des scénarios énergétiques qui sont comparés dans cette présente note.

## Une réduction de la demande

---

L'étude ADEME s'inscrit en continuité avec l'un des points-clé du débat national sur la transition énergétique : cette transition vers un système énergétique réduisant drastiquement les émissions de gaz à effet de serre ne sera possible qu'avec une baisse de la consommation, y compris pour l'électricité. Ainsi, les quatre mix étudiés ici envisagent tous une réduction de la demande d'électricité - le scénario négaWatt prévoyant d'exploiter plus encore que l'ADEME les potentiels de sobriété et d'efficacité énergétiques -, malgré l'augmentation prévisible de la population.

Cette diminution de la consommation ne doit bien entendu pas être confondue avec une baisse des usages de l'électricité ou du confort, au contraire : l'amélioration rapide et permanente de l'efficacité des appareils permet d'augmenter certains usages tout en réduisant la quantité d'électricité nécessaire à la satisfaction des besoins.

L'ADEME met l'accent sur le double bénéfice d'une telle politique. En effet, une forte consommation renchérit le coût de l'énergie de deux manières : il faut bien sûr produire plus d'énergie électrique (un volume plus important de TWh) mais également répondre à une demande instantanée plus forte (une puissance de pointe plus élevée en GW). Or ce rapport confirme que toute augmentation en volume (en TWh) implique une augmentation de la pointe (en GW) encore plus significative. Toute politique accroissant la demande nécessite donc de disposer d'équipements de production et de stockage toujours plus importants.

## Des gisements d'énergies renouvelables trois fois supérieurs à la demande

---

L'étude ADEME estime que le potentiel de production électrique par les énergies renouvelables est de 1268 TWh, soit trois fois la demande d'électricité. Il s'agit du productible technologiquement, physiquement et économiquement accessible, calculé à partir du potentiel de chaque filière région par région.

Ce potentiel très important offre donc une réelle marge de manœuvre, permettant d'envisager une planification territoriale optimisée des renouvelables en fonction à la fois des différences des gisements régionaux, du niveau et des spécificités de la demande locale, et des interconnexions existantes ou réalisables entre territoires. Les fortes disparités de production régionales observées aujourd'hui pourront ainsi être progressivement gommées.

## L'éolien, « cheval de trait » de la transition énergétique

---

L'étude confirme que l'éolien terrestre sera dans tous les cas quantitativement la première filière de production d'électricité renouvelable. Les scénarios proposés ont cependant une approche très différente de l'importance de l'éolien dans le mix de production électrique.

Le mix [ADEME Ref] envisage ainsi un niveau important de production éolienne, de 303 TWh, soit 63 % du mix. Cette production se fait très majoritairement par de l'éolien terrestre (261 TWh, avec 96,5 GW installés). Le scénario négaWatt apparaît en regard bien plus modéré puisque la production éolienne terrestre est de 108 TWh, avec 48 GW installés.

Le nombre de machines installées est donc plus faible dans le scénario négaWatt, le nombre d'installations nouvelles projetées par celui-ci étant 3 à 4 fois le nombre actuel d'éoliennes déjà en service, une densité qui paraît compatible avec les contraintes d'implantation.

Le mix [ADEME Accept] réduit de son côté la part de l'éolien terrestre à 127 TWh pour 48 GW, ce qui correspond précisément au niveau de puissance du scénario négaWatt.

Enfin, le mix [ADEME 40 %] est très peu ambitieux sur l'éolien terrestre : la puissance en service en 2050 ne serait que de 14,5 GW, une valeur presque égale au tiers de la capacité de production qui est d'ores et déjà installée en Allemagne.

La productivité de l'éolien terrestre est plus faible dans le scénario négaWatt que dans les mix ADEME (2750 heures par an de fonctionnement à pleine puissance pour l'ADEME, contre 2244 h/an pour le scénario négaWatt). Cette différence s'explique par la prise en compte dans l'étude ADEME d'éoliennes dites de « nouvelle génération » (NG dans l'étude de l'ADEME), contrairement au scénario négaWatt élaboré en 2011 alors que cette évolution technologique majeure n'était encore qu'en devenir : le scénario négaWatt dispose donc sur ce point de marges de manœuvres supplémentaires.

L'arrivée de ces nouveaux modèles de machines adaptées à des régimes de vent plus faibles, change en effet la donne en augmentant significativement leur durée de fonctionnement et en ouvrant la porte à une répartition spatiale plus équilibrée des parcs sur l'ensemble du territoire national.

À l'inverse l'étude de l'ADEME prend en compte cette véritable "révolution silencieuse", qui a par ailleurs fait l'objet d'une autre étude, commanditée également par l'ADEME, actuellement en cours de consultation auprès des acteurs de la filière avant publication.

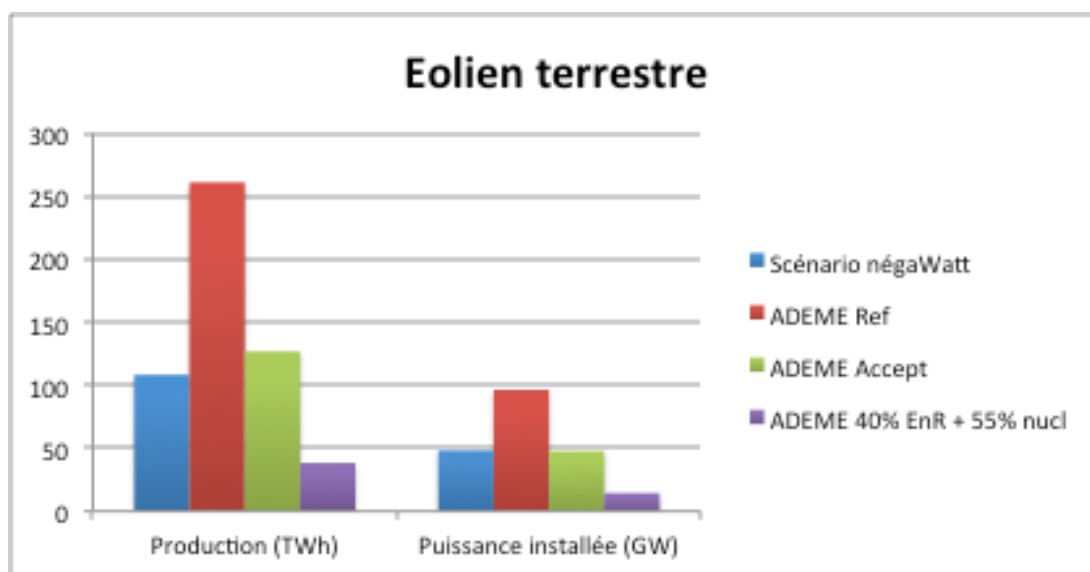


Figure 1 : Production et puissance installée de l'éolien terrestre dans les quatre mix étudiés

En mer, le mix [ADEME Ref] envisage l'installation de 10 GW d'éolien offshore, pour une production de 42 TWh. Le mix [ADEME Accept], moins volontariste sur l'éolien terrestre, est plus ambitieux sur le maritime, avec l'installation de 25 GW produisant près de 105 TWh, davantage que le scénario négaWatt (101 TWh pour 30 GW installés). Comme pour le terrestre, l'ADEME envisage une productivité plus importante que négaWatt pour l'éolien maritime (4190 h/an contre 3358), au vu des retours d'expérience accumulés ces dernières années.

Enfin, le mix [ADEME 40% EnR + 55% nucl] envisage l'installation de seulement 2,8 GW d'éolien offshore, soit une puissance à peine équivalente à celle d'ores et déjà programmée dans les deux appels d'offre attribués.

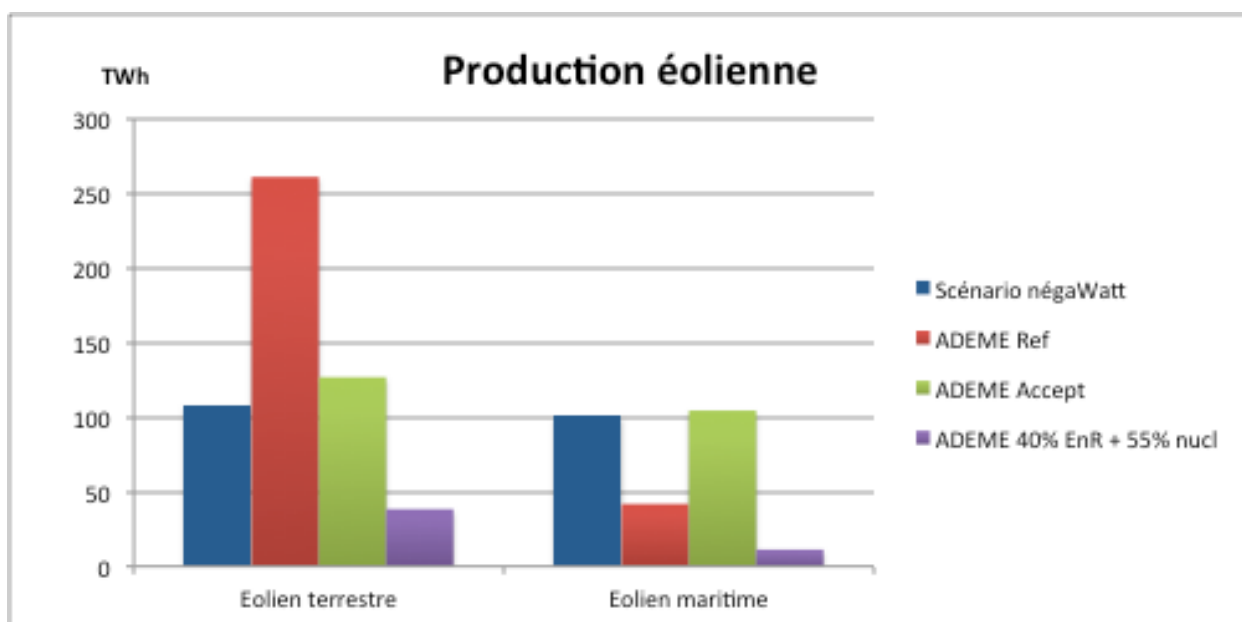


Figure 2 : Production éolienne terrestre et maritime dans les quatre mix étudiés

## Le solaire photovoltaïque, un gisement considérable

L'étude ADEME intègre bien la très rapide baisse des coûts du photovoltaïque qui est, avec les éoliennes de nouvelle génération, un autre levier puissant de pénétration des renouvelables et du rapprochement puis du croisement des coûts des filières renouvelables matures avec les énergies conventionnelles.

L'analyse du gisement confirme un potentiel d'équipement très important : 47 GW au sol et 364 GW en toiture, soit 5 fois plus que la capacité réellement installée en 2050 dans le scénario négaWatt (81 GW).

Le mix [ADEME Ref], avec 63 GW, est moins ambitieux dans ce domaine que le scénario négaWatt, tandis que le mix [ADEME Accept] fait le choix, pour compenser la plus faible installation d'éoliennes, d'un développement plus important de cette technologie en envisageant l'installation de 93 GW.

Quant au mix [ADEME 40 % EnR + 55 % nucléaire], il est très peu ambitieux puisqu'il table sur une capacité de seulement 21 GW dans 35 ans, soit la moitié de la puissance d'ores et déjà installée en Allemagne (41 GW) en 2015, et peu cohérent avec les progrès enregistrés par le photovoltaïque vers la parité réseau.

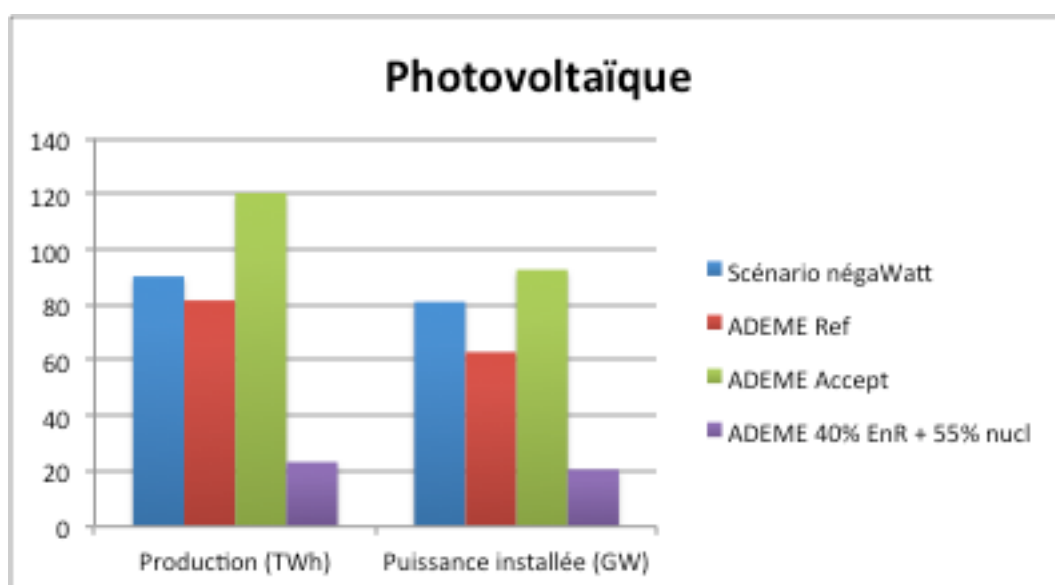


Figure 3 : Production et puissance installée en photovoltaïque dans les quatre mix étudiés

## Le déclin du nucléaire

Le mix [ADEME 40 % EnR + 55 % nucl] est le seul à intégrer le maintien d'une production nucléaire en 2050, qui se situe à hauteur de 55 % du mix électrique. Ce niveau est supérieur à l'objectif de 50 % énoncé dans le projet de loi de transition énergétique pour l'année 2025. Il correspond à 20 réacteurs EPR de 1650 MW, soit l'équivalent d'un EPR dans chacune des 19 centrales nucléaires en service en France.

Les trois autres mix ne comportent aucune production nucléaire. Pour se faire, le scénario négaWatt permet de décrire une trajectoire cohérente d'arrêt sans prolongation au-delà de 40 ans de durée de vie du parc nucléaire existant, concomitant avec une montée en puissance des énergies renouvelables permettant d'atteindre quasiment les 100 % d'électricité d'origine renouvelable en 2050.

## Les fossiles, énergies à proscrire

Le mix [ADEME 40 % EnR + 55 % nucl] est le seul qui recourt significativement aux énergies fossiles par des centrales à gaz naturel, pour 20 TWh. Les émissions de GES correspondantes sont non négligeables dans une optique de facteur 4, alors que les autres mix ont un secteur électrique à 99 % (négaWatt) ou 100 % exempt d'émissions.

## La biomasse, le biogaz et les déchets, des sources de flexibilité pour la production d'électricité

Avec un peu plus de 30 TWh, le recours à la biomasse + biogaz est du même ordre dans les quatre mix, même si l'exploitation ne se fait pas de la même manière. Le scénario négaWatt privilégie l'utilisation du biogaz produit par méthanisation ou gazéification de biomasse tandis que l'ADEME préfère la combustion de biomasse solide (bois).

En revanche, la production d'électricité par la vapeur produite par l'incinération de déchets est bien plus réduite dans le scénario négaWatt que dans les mix ADEME (0,4 contre 3,8 TWh), conséquence d'une politique plus poussée de compostage et méthanisation des déchets organiques.

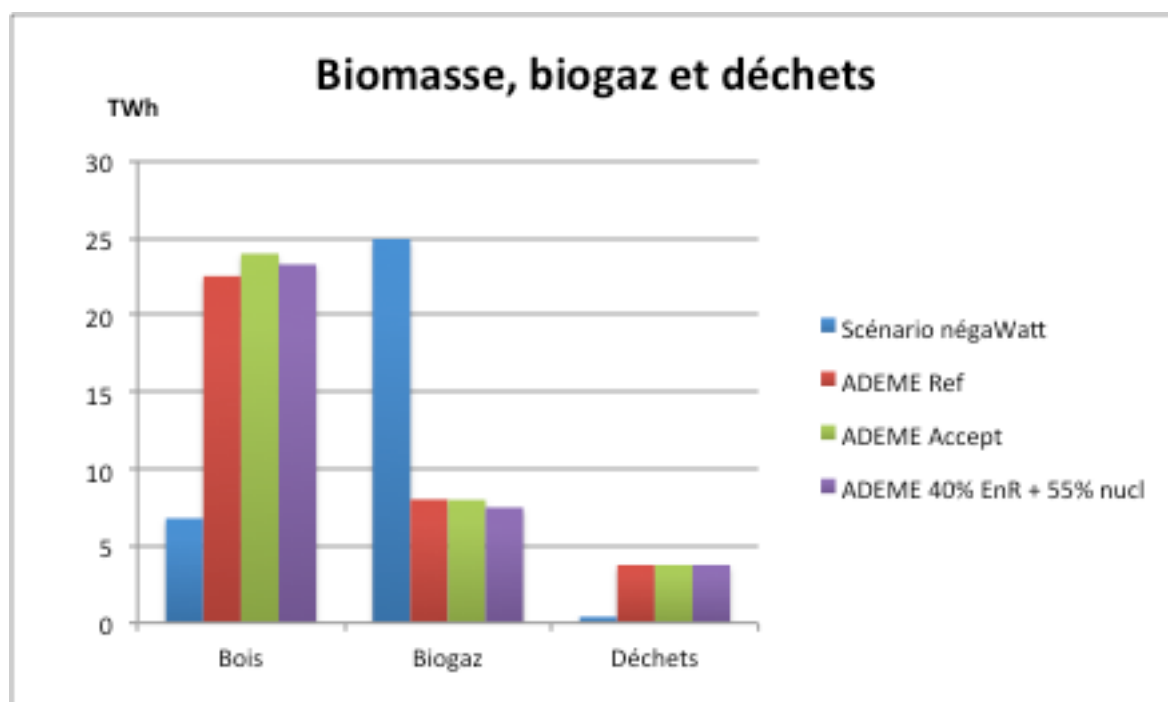


Figure 4 : Production d'électricité à partir de biomasse, de biogaz et de déchets dans les quatre mix étudiés

## Les énergies marines restent marginales

---

Trois des quatre mix sont assez prudents sur les productions issues de l'énergie des vagues ou des courants. Seul le mix [ADEME Accept] paraît ambitieux avec 24 TWh produits par ces énergies marines.

## Pilotage de la demande

---

L'étude ADEME intègre un pilotage de la consommation de quatre usages électriques : véhicules, production d'eau chaude sanitaire, chauffage, et usages blancs (lave-linge, lave-vaisselle et sèche-linge). Grâce à l'installation d'une seconde génération de compteurs communicants à l'horizon 2050, la flexibilité annuelle totale est de 57 TWh. Les pointes de report de consommation sont respectivement les suivantes : 7 GW, 4 GW, 14 GW et 0,7 GW<sup>1</sup>.

Ce pilotage de la demande est nettement plus ambitieux que celui envisagé dans le scénario négaWatt, qui conserve une puissance d'effacement de 2,8 GW - telle qu'observée actuellement - jusqu'en 2050. Cette hypothèse conservatrice laisse si besoin des possibilités supplémentaires de flexibilité sur la demande d'électricité.

## Stockage et pilotage de l'offre

---

Trois types de stockage sont envisagés dans l'étude ADEME : un stockage de court-terme, notamment destiné à absorber les pointes de productions photovoltaïques, les STEP (stations de transfert d'électricité par pompage), et le stockage inter-saisonnier, par l'intermédiaire du power-to-gaz-to-power (conversion des surplus d'électricité en méthane, puis reconversion de méthane en électricité lors de déficits de production). Les puissances de stockage installées sont respectivement de 12, 7 et 17 GW, permettant ainsi au mix électrique reposant sur une part importante d'énergies variables d'assurer en permanence la couverture des besoins de consommation.

Dans le scénario négaWatt, les besoins de stockage sont de manière générale moins élevés, notamment du fait d'une plus forte réduction des consommations. Aucun stockage de court-terme n'est rendu nécessaire. La puissance installée de STEP est supposée constante à celle déjà installée en 2010 (4,2 GW), et 20 GW permettent de convertir de l'électricité en méthane. Ce dernier n'est ensuite que très marginalement utilisé pour produire de l'électricité en retour, son utilisation dans les transports - en remplacement des produits pétroliers - ou dans le chauffage des bâtiments - pour les besoins résiduels, une fois les travaux d'efficacité énergétique réalisés - étant privilégiée.

---

<sup>1</sup> Les valeurs indiquées ici sont issues du document provisoire publié par l'ADEME, page 20. Elles diffèrent de celles que l'on retrouve page 63 de ce même document. Elles sont donc mentionnées ici à titre indicatif, en attente de davantage d'éléments de précision.

### 3 mix sur 4 pour un nouveau paysage énergétique, un quatrième sujet à caution

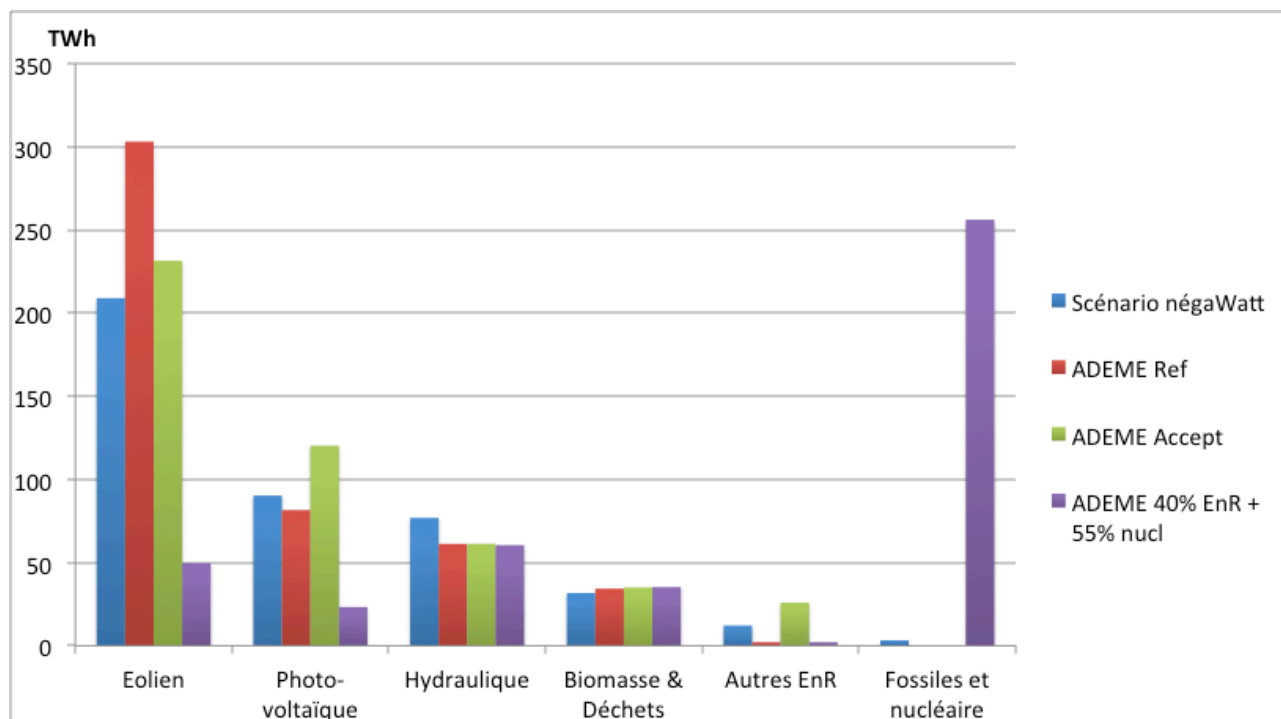


Figure 5 : Comparaison des différentes sources d'électricité renouvelable dans les quatre mix étudiés

Le scénario de référence proposé par l'ADEME dans cette étude se distingue par une forte capacité éolienne installée, notamment à terre. Sa variante dite « à acceptabilité renforcée » insiste davantage sur le développement du photovoltaïque pour compenser la moindre production éolienne. Grâce à une plus grande réduction des consommations, le scénario négaWatt permet quant à lui d'obtenir une puissance éolienne installée encore moins élevée, tout en se rapprochant de la puissance photovoltaïque du scénario de référence. Ce scénario se distingue également par une production hydraulique plus importante.

Les moyens de pilotage de la demande et de stockage d'électricité sont moins importants dans le scénario négaWatt que dans les mix ADEME. C'est là aussi le résultat d'un travail plus important de réduction des consommations d'électricité, qui porte ses fruits non seulement en énergie mais aussi en puissance.

Enfin, à la différence de ces 3 autres mix, le mix [ADEME 40 % EnR + 55 % nucl] envisage un faible développement des énergies renouvelables pour conserver une part importante d'énergie nucléaire. Compte tenu des résultats de l'étude de l'ADEME, le maintien d'une forte production d'énergie fissile ne pourra désormais se justifier qu'en apportant la preuve que les gains sociaux, économiques et environnementaux sont bien réels et supérieurs à ceux des autres options.

D'une manière plus générale, cette comparaison montre que les trois mix 100 % renouvelables comparés dans cette présente note sont rendus possibles grâce aux mêmes choix structurants : une énergie éolienne qui représente 50 % ou plus de la production d'électricité, le photovoltaïque qui devient le second moyen de production, une contribution significative de la biomasse et du biogaz comme moyen de flexibilité de la production d'électricité, et des moyens de pilotage de l'offre permettant de compenser le caractère variable de certaines sources d'énergies renouvelables.

Chacun d'eux prend également en compte une réduction de la demande d'électricité (mais pas de son usage, qui augmente), la principale différence résidant finalement dans un potentiel plus grand de sobriété et d'efficacité énergétique atteint dans le scénario négaWatt, permettant de desserrer davantage les contraintes du système électrique et d'envisager des capacités de production et de flexibilité moins importantes.

	Production annuelle TWh				Puissance installée GW				
	nW 2050	Ademe 100% EnR-e 2050			nW 2050	Ademe 100% EnR-e 2050			
		SnW 2011 màj 2013	[ADEME Ref] Mix de référence 100 % EnR	[ADEME Accept] Mix dit à acceptabilité renforcée		[ADEME 40% EnR + 55% nucléaire]	SnW 2011 màj 2013	[ADEME Ref] Mix de référence 100 % EnR	
Nucléaire	0	0,0	0	236,3	0	0,0	0	36,5	
Charbon	0				0				
Gaz	24,1	0	0	19,8	12,6	0	0	1,9	Gaz fossile et renouvelable
Fioul	0,2				4,7				
Cogen Bois	6,8	22,5	23,3	24	2,4	3,0	3,0	3,0	Cogénération à biomasse solide
Déchets UIOM	0,4	3,8	3,8	3,8	0,2	0,4	0,4	0,4	Incinerateur
Cogen méthanisation	3,5	8,0	8	7,5	1	0,9	0,9	0,9	Cogénération méthanisation
Eolien terrestre NG	108,4	208,3	82,5	20,5	48,3	73,6	29,5	7,3	A terre, NG : nouvelle génération
Eolien terrestre AG		52,9	44,4	17,9		22,9	18,3	7,2	A terre AG : ancienne génération
Eolien offshore posé	100,6	41,9	63,5	11,3	30,0	10,0	15,4	2,8	En mer, posé
Eolien offshore flottant			41				9,4		En mer, flottant sur barges
PV toiture	90,3	30,2	87,7	20,2	81,1	25,4	68,3	18,2	Photovoltaïque sur toit
PV sol		51,4	32,6	3,1		37,6	24,4	2,4	Centrales photovoltaïques au sol
Marémotrice	6,5	0,5	0,5	0,5	1,64	0,2	0,2	0,2	Usine marémotrice de la Rance
Houlomotrice			22,6				5,1		Energie des vagues et de la houle
Hydrolienne			1,1				0,2		Énergie des courants
Hydraulique réservoirs	76,9	27,4	27,4	26,6	24,3	13,2	13,2	13,2	Barrages sur lacs et retenues
Hydraulique fil de l'eau		33,9	33,9	33,9		7,6	7,6	7,6	Barrages au fil de l'eau
Géothermie	5,7	1,2	1,2	1,2	0,8	0,1	0,1	0,1	Géothermie profonde à haute T°
CSP		0,5	0,5	0,5	0	0,4	0,4	0,4	Centrale solaire thermodynamique à concentration
<b>Total Production</b>	<b>423,4</b>	<b>482,5</b>	<b>473,9</b>	<b>427,0</b>					
<b>Total Puissance</b>					<b>207,0</b>	<b>195,3</b>	<b>196,4</b>	<b>102,1</b>	

Tableau 1 : Comparaison détaillée de la production et de la puissance installée des quatre mix étudiés