

Analyse de Cycle de Vie

Projet multi-énergies PHARES - Akuo

Information - ACV	
Client	Akuo
Date ACV	02/11/2020
Périmètre ACV	3 centrales photovoltaïques 1 éolienne 1 hydrolienne 1 batterie de stockage
Adresse du site	Ile d'Ouessant
Coordinateur ACV	Ronan COUSQUER – Alta Energy

1. Présentation de l'étude

L'objectif de cette Analyse de Cycle de Vie (ACV) est de calculer l'évolution de l'empreinte carbone de l'électricité produite sur l'île d'Ouessant avant et après la mise en route du projet PHARES :

- Aujourd'hui : production 100% centrale thermique
- Intégration projet PHARES :
 - 35% centrale thermique
 - 65% production ENR¹

Le projet PHARES développé par Akuo inclut :

- Une centrale PV² au sol SolarGEMS de 375kW
- Une serre PV de 36kW
- Une centrale PV sur toiture Sunstyle de 45kW
- Une éolienne Enercon de 900kW
- Deux hydroliennes Sabella de 1 000 kW au total
- Une batterie de stockage de 2041kWh

2. Résultats de l'ACV

Les résultats de l'ACV sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Empreinte centrale thermique	850	gCO ₂ -eq/kWh
Empreinte ENR	50	gCO ₂ -eq/kWh
Mix Ouessant	333	gCO ₂ -eq/kWh

Tableau 1 : Résultats de l'ACV

Ainsi l'empreinte carbone de chaque kWh produit sur l'île de Ouessant passe de 850gCO₂-eq à 333gCO₂-eq avec le projet PHARES. A titre de comparaison, le mix français est de 52gCO₂-eq/kWh, celui de l'Allemagne de 635gCO₂-eq/kWh et celui de la Chine de 1027gCO₂-eq/kWh.

Les résultats détaillés sont donnés dans le tableau ci-dessous :

		SolarGEMS	Serres	Sunstyle	Eolienne Enercon	Hydrolienne Sabella	Stockage	Total ENR	Centrale thermique
Empreinte carbone	gCO ₂ /kWh	88	66	105	8	78	1.7	44	850
Temps de retour carbone	an	2.1	1.6	2.5	0.2	1.8			
Puissance		375 kW	36 kW	45 kW	900 kW	1000 kW	2041 kWh		
Production électrique consommée	MWh/an	262	31	29	1 889	2 117		4 329	2 371
Durée de vie	ans	25	25	25	20	20	15		20
Empreinte carbone sur 20ans	kgCO ₂ -eq	462 838	41 767	61 987	293 941	3 308 474	145 217		4 314 223

Tableau 2 : Résultats de l'ACV par composante

¹ ENR = Energie(s) renouvelable(s)

² PV = photovoltaïque

L'impact de chaque composante du projet PHARES est présenté dans le graphe ci-dessous :

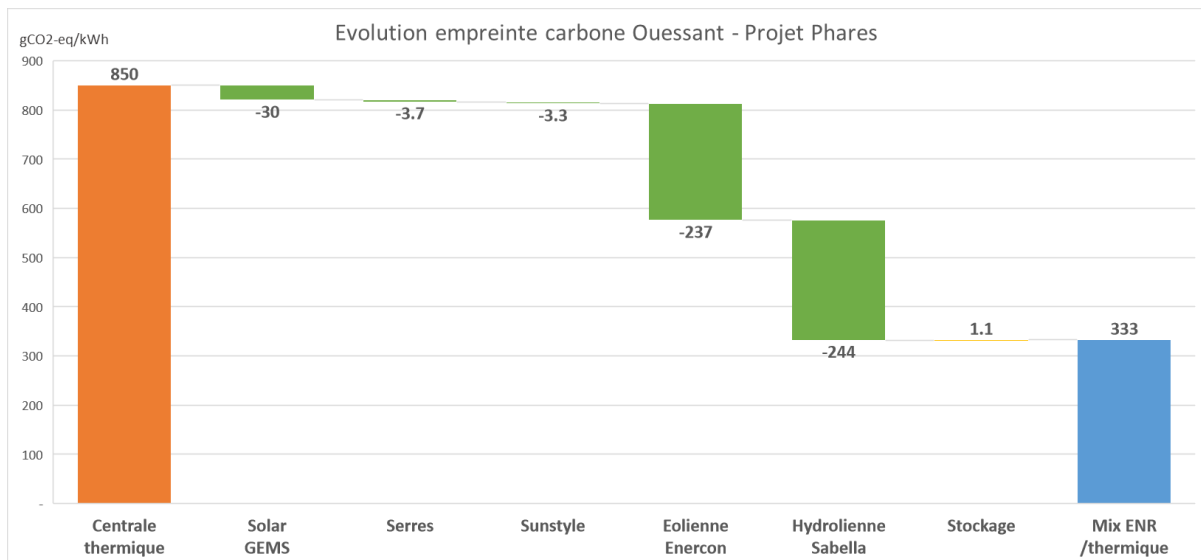


Figure 1 : Impact de chaque composante du projet PHARES

Il faut bien différencier pour chaque élément :

- L'empreinte carbone par kWh (Empreinte carbone - tableau 2) qui est entre **8 et 110 fois inférieure à une centrale thermique.**
- L'impact sur le mix de Ouessant (Figure 1) qui dépend de cette empreinte par kWh et de la production électrique sur une année.

L'impact du stockage est positif (dans le sens où il augmente l'empreinte carbone) dans le graphe ci-dessus car il ne produit pas directement d'énergie. Son impact est cependant négatif de manière indirecte car il permet d'augmenter la part des renouvelables dans le mix de Ouessant et ainsi diminuer l'utilisation de la centrale thermique.

3. Méthodologie de l'ACV

Cette analyse de cycle de vie inclue l'ensemble du cycle de vie de chaque Produit :

- Fabrication des composants
- Transport
- Construction
- Exploitation
- Fin de vie

L'unité fonctionnelle (unité de référence à laquelle les flux comptabilisés sont ramenés) retenue pour cette étude est la production d'un kilowattheure d'électricité injecté sur le réseau de l'île de Ouessant.

L'étude est basée sur la métrologie ACV ISO 14040 : 2006.

Les émissions de GES sont calculées en CO2-équivalent selon la méthode IPCC2013-100a.

4. Méthodologie ACV photovoltaïque

Calcul du facteur d'impact

Les ACV des trois centrales photovoltaïques sont basées sur :

- Le référentiel ADEME ACV centrale PV³
- L'Évaluation carbone simplifié (ECS) des modules pour les AO CRE⁴
- Ecoinvent 3.5

Méthodologie ACV	
Élément	Source
Infrastructure PV	
Module PV	Voir ci-après
Onduleur	Référentiel ADEME
Support	Référentiel ADEME & Ecoinvent
Connexion électrique	Référentiel ADEME
Transformateur	Référentiel ADEME
Infrastructure complémentaire	
Route d'accès	Ecoinvent
Local technique	Référentiel ADEME
Clôture	Référentiel ADEME
Container Solar GEMS	Ecoinvent
Chantier	
Installation	Référentiel ADEME
Désinstallation	Référentiel ADEME
Entretien	
Nettoyage des modules	Référentiel ADEME
Transport des agents de maintenance	Référentiel ADEME

Tableau 3 : Facteur d'impact PV

Le process « Route d'accès » a été modélisé sur la base du processus Ecoinvent « Road, company, internal {RoW}| construction ». En effet, le référentiel ADEME est basé sur une route bitumée tandis que la route construite pour ce projet est en gravier.

Le process « Container Solar GEMS » a été modélisé sur la base du processus Ecoinvent « Intermodal shipping container, 20-foot {GLO}| market for | APOS, S». Il est prévu que les containers soient recyclés en fin de vie, même si l'organisme de recyclage n'est pas encore connu à ce jour. L'impact (positif) du recyclage n'est pas pris en compte dans l'analyse.

³ <https://www.ademe.fr/>

⁴ <https://www.cre.fr/>

Calcul du facteur d'impact Module PV

La fabrication du panneau solaire représente environ 70% de l'empreinte carbone d'une centrale PV et nécessite donc de modéliser au plus juste les différentes étapes de fabrication du panneau. Depuis plusieurs années, de nombreux fabricants de panneaux ont effectué ce travail d'ACV dans leurs usines dans le cadre des AO CRE qui nécessitent un bilan carbone des panneaux. Ces ACV sont validées par l'ADEME. Certaines de ces ACV, lorsqu'elles correspondent aux usines des fabricants choisis par Akuo, ont été réutilisées dans cette étude.

Le facteur d'impact comprend les éléments suivants :

Facteur d'impact Module PV	
PolySi - ingot - wafer - cell manufacturing	ACV & valeurs par défaut AO CRE
Verre - EVA & PET	
Assemblage module PV	
Frame	Ecoinvent
Transport	Ecoinvent
Fin de vie	Ecoinvent

Tableau 4 : Facteur d'impact module PV

5. Centrale PV 1 : SolarGEMS

Les SolarGEMs sont des centrales PV intégrées dans des conteneurs de transport standard. Ils sont utilisés pour former un champ solaire, en dépliant une structure métallique intégrée à l'intérieur du container, qui supporte les modules PV.



Figure 2 : SolarGEMs

Le champ solaire du projet PHARES comprend 5 containers SolarGEMs pour une centrale totale de 375kWp. La centrale est modélisée comme une centrale au sol classique selon le référentiel ADEME en rajoutant l'impact des containers.

Le bilan carbone de la centrale est donné ci-dessous :

Bilan carbone de la centrale PV	en kgCO ₂ eq	en kgCO ₂ eq /kWc	en gCO ₂ eq /kWh	%
Total	578 546.9	1 542.8	88.5	100%
Infrastructure PV	475 976.1	1 269.3	72.8	82.3%
Module PV	349 735.4	932.6	53.5	60.5%
Onduleur	16 341.0	43.6	2.5	2.8%
Support	80 342.2	214.2	12.3	13.9%
Connexion électrique	26 287.5	70.1	4.0	4.5%
Transformateur	3 270.0	8.7	0.5	0.6%
Infrastructure complémentaire	81 678.6	217.8	12.5	14.1%
Route d'accès	2 859.2	7.6	0.4	0.5%
Local technique	2 730.0	7.3	0.4	0.5%
Clôture	14.2	0.0	0.0	0.0%
Container	76 075.2	202.9	11.6	13.1%
Chantier	3 532.5	9.4	0.5	0.6%
Installation	1 766.3	4.7	0.3	0.3%
Désinstallation	1 766.3	4.7	0.3	0.3%
Entretien	17 359.7	46.3	2.7	3.0%
Nettoyage des modules	379.7	1.0	0.1	0.1%
Transport des agents de maintenance	16 980.0	45.3	2.6	2.9%

Tableau 5 : Bilan carbone SolarGEMs

6. Centrale PV 2 : Serres solaires

Les serres solaires sont composées de rangées de panneaux installés à 4m du sol et à 8m les unes des autres afin de combiner production électrique et agriculture au sol. L'élément « support » du référentiel ADEME a été modifié pour prendre en compte les spécificités des serres par rapport à une centrale sol classique. La hauteur importante des serres implique notamment plus de kg de structure par panneau. Ainsi, l'impact de la structure est deux fois plus impactant que pour une centrale sol classique.

Le bilan carbone de la centrale est donné ci-dessous :

Bilan carbone de la centrale PV	en kgCO ₂ eq	en kgCO ₂ eq /kWc	en gCO ₂ eq /kWh	%
Total	52 208.2	1 466.5	66.3	100%
Infrastructure PV	50 724.5	1 424.8	64.4	97.2%
Module PV	31 038.5	871.9	39.4	59.5%
Onduleur	2 085.0	58.6	2.6	4.0%
Support	15 105.4	424.3	19.2	28.9%
Connexion électrique	2 495.6	70.1	3.2	4.8%
Transformateur	-	-	-	0.0%
Infrastructure complémentaire	264.4	7.4	0.3	0.5%
Route d'accès	-	-	-	0.0%
Local technique	259.2	7.3	0.3	0.5%
Clôture	5.3	0.1	0.0	0.0%
Container	-	-	-	0.0%
Chantier	335.4	9.4	0.4	0.6%
Installation	167.7	4.7	0.2	0.3%
Désinstallation	167.7	4.7	0.2	0.3%
Entretien	883.9	24.8	1.1	1.7%
Nettoyage des modules	34.9	1.0	0.0	0.1%
Transport des agents de maintenance	849.0	23.8	1.1	1.6%

Tableau 6 : Bilan carbone Serres

7. Centrale PV 3 : Tuiles photovoltaïques Sunstyle

Une toiture Sunstyle est composée de grandes tuiles de 870x870mm intégrant des cellules PV. Les tuiles sont fabriquées en France dans une usine ayant fait un audit ACV avec Alta Energy en 2019. Les données de cette ACV ont été adaptées pour la tuile Sunstyle.

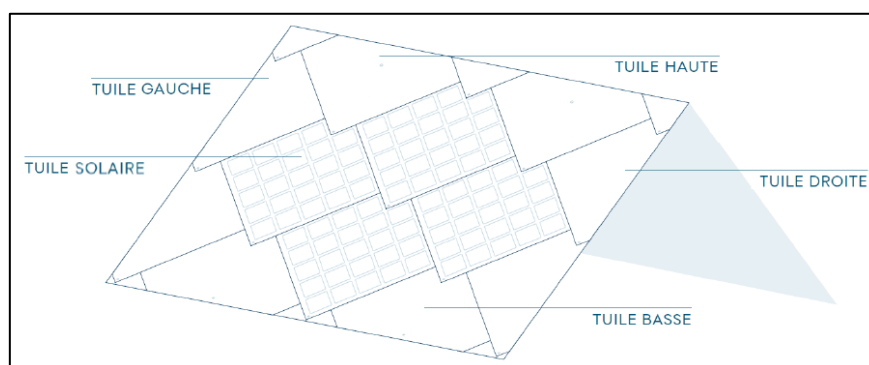


Figure 3 : Tuile Sunstyle

Le reste de la centrale a été modélisé selon le référentiel de l'ADEME pour les systèmes intégrés ou liés au bâtiment.

Le bilan carbone de la centrale est donné ci-dessous :

Bilan carbone de la centrale PV	en kgCO ₂ eq	en kgCO ₂ eq /kWc	en gCO ₂ eq /kWh	%
Total	77 483.2	1 706.7	105.5	100%
Infrastructure PV	76 568.6	1 686.5	104.3	98.8%
Module PV	52 142.7	1 148.5	71.0	67.3%
Onduleur	2 301.0	50.7	3.1	3.0%
Support	18 942.4	417.2	25.8	24.4%
Connexion électrique	3 182.5	70.1	4.3	4.1%
Transformateur	-	-	-	0.0%
Infrastructure complémentaire	-	-	-	0.0%
Route d'accès	-	-	-	0.0%
Local technique	-	-	-	0.0%
Clôture	-	-	-	0.0%
Container	-	-	-	0.0%
Chantier	3.3	0.1	0.0	0.0%
Installation	1.7	0.0	0.0	0.0%
Désinstallation	1.7	0.0	0.0	0.0%
Entretien	911.3	20.1	1.2	1.2%
Nettoyage des modules	62.3	1.4	0.1	0.1%
Transport des agents de maintenance	849.0	18.7	1.2	1.1%

Tableau 7 : Bilan carbone Sunstyle

8. Eolienne Enercon

L'entreprise Enercon, fabricante de l'éolienne E-44 qui sera installée pour le projet PHARES, a réalisé une ACV pour ce produit.

Cette ACV est compatible avec cette étude car elle comprend toutes les étapes de cycle de vie de l'éolienne : production, transport, installation, exploitation, démantèlement et fin de vie :

	Impact GES
Enercon E-44	293 941 kgCO ₂ -eq
<i>Production</i>	<i>89%</i>
<i>Transport</i>	<i>1%</i>
<i>Installation</i>	<i>19%</i>
<i>Exploitation</i>	<i>10%</i>
<i>Démantèlement</i>	<i>2%</i>
<i>Fin de vie</i>	<i>-22%</i>

Tableau 8 : ACV Enercon E-44

9. Hydroliennes Sabella

L'entreprise Sabella a réalisé une ACV pour le projet PHARES. Les résultats de cette étude ont été réutilisés :

Phase de vie	Bilan énergétique (kWh consommé par kWh produit)	Bilan carbone (kg CO ₂ eq. par kWh produit)
Construction	0,117	0,027
Installation	0,048	0,013
Exploitation (maintenance)	0,165	0,044
Fin de vie	0,016	0,002
Total	0,347	0,087

Figure 4 : Bilan énergétique et bilan carbone du volet hydrolien du projet PHARES

L'ACV de Sabella a été faite à une époque encore peu avancée du développement du projet. La production annuelle avait alors été estimée, de manière conservatrice, à 950 MWh/an par hydrolienne (1 900 MWh/an au total pour les deux hydroliennes). La production des hydroliennes par Sabella est estimée aujourd'hui à 2 400 MWh/an. Cette estimation plus précise a été utilisée dans cette ACV avec un facteur de sécurité de 10%.

10. Batterie de stockage

Une batterie de stockage de 2 041kWh est installée pour compenser le caractère intermittent de la production renouvelable. Le stockage permet de stocker le surplus d'énergie quand l'île de Ouessant consomme moins que la production renouvelable et de réutiliser cette énergie lorsque la production n'est pas suffisante pour répondre à la demande.

La batterie est fabriquée par Samsung et est composée de :

- 255 modules de stockage de 8kWh
- Des armoires de rangements

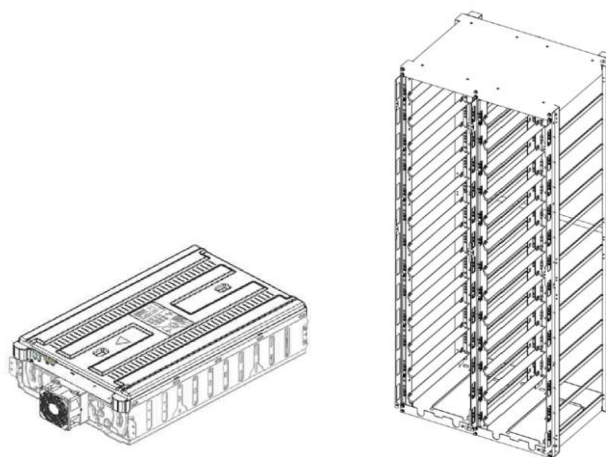


Figure 5 : Module de stockage et armoire de rangement

Le bilan carbone de la batterie de stockage a été calculé sur Simapro sur la base du poids de chaque élément et des distances de transport :

	Quantity		Ecoinvent	GWP kgCO ₂ -eq
	Unit	Value		
Modules de stockage	kg	13 777	Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic {GLO} market for APOS, S	84 081
Armoires	kg	991	Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, S	1 738
	kg	991	Metal working, average for steel product manufacturing {GLO} market for APOS, S	1 985
Transport bateau	tkm	177 214	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for APOS, S	2 005
Transport camion	tkm	10 337	Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market for APOS, S	1 369
Transport ferry	tkm	10 337	Transport, freight, sea, ferry {GLO} market for transport, freight, sea, ferry APOS, S	1 131
Armoire- fin de vie	kg	991	Scrap steel {RoW} market for scrap steel APOS, S	9
Modules - fin de vie	kg	13 777	Used Li-ion battery {GLO} market for APOS, S	16 596
Empreinte carbone				108 913
Total par kWh				53.4

Tableau 9 : Bilan carbone batterie

11. Résultats de l'ACV

Les résultats de l'ACV sont donnés ci-dessous :

		SolarGEMS	Serres	Sunstyle	Eolienne Enercon	Hydrolienne Sabella	Stockage	Total ENR	Centrale thermique
Empreinte carbone	gCO ₂ /kWh	88	66	105	8	78	1.7	44	850
Temps de retour carbone	an	2.1	1.6	2.5	0.2	1.8			
Puissance		375 kW	36 kW	45 kW	900 kW	1000 kW	2041 kWh		
Production électrique totale	MWh/an	344	41	39	2 304	2 160		4 888	
Ecrêtage de la production	%		24%		18%			2%	
Production électrique consommée	MWh/an	262	31	29	1 889	2 117		4 329	2 371
Durée de vie	ans	25	25	25	20	20	15	20	
Empreinte carbone	kgCO ₂ -eq	578 547	52 208	77 483	293 941	3 308 474	108 913	4 419 567	
Empreinte carbone sur 20ans	kgCO ₂ -eq	462 838	41 767	61 987	293 941	3 308 474	145 217	4 314 223	

Tableau 10 : Résultats de l'ACV – Projet Phares

La production électrique annuelle de chaque élément ainsi que les écrêtages prévus pour chaque ENR ont été fournis par Akuo sur la base des estimations d'EDF :

- Ecrêtage PV : 24%
- Ecrêtage Eolien : 18%
- Ecrêtage Hydrolien : 2%

La production thermique restante a été calculée sur la base des estimations annuelles de :

- Consommation de l'île estimée par EDF : 6 700MWh
- Production ENR consommée : 4 329 MWh

Deux empreintes carbonées sont données :

- La première, sur la durée de vie de chaque produit (de 15 à 25 ans)
- La deuxième, sur 20 ans, afin d'avoir une étude sur la même période pour chaque produit.

Le temps de retour carbone correspond à la durée de production nécessaire afin de compenser l’empreinte carbone de la centrale pendant toute sa durée de vie. Cette compensation correspond à 850gCO₂-eq pour chaque kWh produit. Il faut ainsi 2 ans aux solarGEMS pour rembourser 578 547 kgCO₂-eq avec une consommation de 262MWh/an et en évitant ainsi la production de cette électricité par la centrale thermique.