



Rapport / Report n° :	IC 830113 Rev. : 01
------------------------------	--------------------------------------

Date	12/10/2021
-------------	------------

Titre / Title	Estimation de la quantité d'aluminium d'anode relarguée par un champ hydrolien dans la zone du raz Blanchard
----------------------	---

Client / Customer	SINAY Fabrice Leroy 14 rue Alfred Kastler Caen France
Commande / Order	<u>N°</u> : BDC2021-069 <u>En date du / in date of</u> : 13/07/2021

Rédigé par / Written by	Charles Leballeur	
Approuvé par / Approved by	Nicolas Larché	

<u>Rev.</u>	<u>Date</u>	<u>Modification / Revision description</u>	<u>Rédigé par / Written by</u>	<u>Approuvé par / Approved by</u>
01	12/10/2021	Création du document	Charles Leballeur	Nicolas Larché

Sommaire

1	Contexte et objectifs	3
2	Conditions expérimentales.....	3
2.1	Généralités sur l'impact environnemental de la protection cathodique	3
2.2	Données utilisées pour l'étude	4
3	Résultats	5
3.1	Estimation de la quantité d'aluminium relargué par le système de protection cathodique.....	5
3.2	Estimation de la quantité d'anode diluée dans l'environnement.....	9
3.3	Comparaison avec le projet EDF OpenHydro.....	13
4	Conclusions	15
5	Références	16
6	Annexes	17

-- Durée de conservation du rapport: 5 ans / *Retention period of this report:5 years* --

1 Contexte et objectifs

Sinay a contacté l'Institut de la Corrosion (IC) dans le but de réaliser une estimation de la quantité d'aluminium d'anode relarguée par le système de protection cathodique appliqué à un champ hydrolien situé dans la zone du raz Blanchard.

2 Conditions expérimentales

2.1 Généralités sur l'impact environnemental de la protection cathodique

De manière générale, quel que soit le type de protection considéré (Protection Cathodique par Courant Imposé : PCCI ou Protection Cathodique par Galvanique : PCAG), il est important de prendre en considération leur possible impact environnemental. En effet, plus particulièrement dans le cas de la protection cathodique par anode galvanique, il peut y avoir des phénomènes de relargage de métaux dus à la consommation de l'anode [4,6–12]. Les espèces relarguées, essentiellement sous forme d'ions ou d'oxydes/hydroxydes métalliques, peuvent être transférées dans l'environnement sous forme dissoutes ou particulaires [4]. Il est donc important de considérer l'impact dans l'eau et dans les sédiments.

Parmi les anodes les plus couramment utilisées, on distingue les anodes à base de zinc, de magnésium et d'alliage d'aluminium. Pour limiter leur passivation, les anodes en aluminium et en zinc ne sont pas formées du métal « pur » et possèdent des éléments d'alliages favorisant leur dissolution. Les anodes à base de magnésium sont plutôt destinées à une application en eau douce et les anodes à base de zinc et d'alliage d'aluminium à une application en eau saumâtre.

Les anodes à base d'alliage d'aluminium sont de plus en plus utilisées au détriment des anodes à base zinc car pour une protection équivalente, l'aluminium présente l'avantage d'être environ 3 fois moins lourd que le zinc. Les anodes de zinc seront toutefois privilégiées dans les eaux plus résistives et/ou à température élevée (meilleur rendement et moins de risque de passivation pour les anodes de zinc dans ces conditions). Dans les deux cas, zinc ou alliage d'aluminium, il a été démontré un relargage de zinc et d'aluminium dans l'environnement [4,6–12], le relargage de zinc étant plus problématique car considéré comme toxique et bioaccumulable [4,7]. C'est donc également en partie pour cela que les anodes à base d'alliages d'aluminium sont privilégiées.

En effet, l'aluminium n'est pas considéré comme toxique au regard des informations fournies par Pineau et al. [4]. De plus, divers essais (bioconcentration et tests écotoxicologiques) sur des moules et des larves d'oursin et huître ont montrés que l'aluminium était bioconcentré mais pas bioaccumulé [4] avec aucun effet sur le développement larvaire des oursins et huîtres [6,12]. Il a également été démontré que la concentration d'aluminium dans l'eau de mer était faible et que l'accumulation d'aluminium avait principalement lieu dans les sédiments [6,8,11]. Néanmoins, il a été conclu qu'il était difficile de remonter formellement à l'origine exacte de cet enrichissement [11].

Il est important de noter que l'aluminium n'est à ce jour pas inscrit dans la liste des substances prioritaires fixées par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). Il ne fait pas l'objet de suivis dans le cadre des réseaux de surveillance de la qualité du milieu marin. Il n'existe pas de directive française définissant des seuils de relargage d'aluminium dans l'eau de mer. La seule directive connue (Décret n°2001-1220) impose depuis 2001 une limite de 200 µg/L à la concentration maximale acceptable en aluminium dans l'eau potable. Bien qu'aucune directive nationale existe, il est possible qu'il existe des décrets régionaux. A notre connaissance, il semblerait que les contraintes appliquées sur le relargage de métaux due aux systèmes de protection cathodique soit fixées par les préfetures en fonction des sites d'exploitation et

de la faune et flore locale. Certaines études récentes et en cours ont pour but de déterminer des seuils de toxicité en eau de mer pour ce type d'application (Projet ANODE et ECOCAP). A noter que la quantité de métaux relargués et dilués dans la masse d'eau brassée dans la zone d'exploitation peut être estimée à partir du dimensionnement de protection cathodique et des volumes d'eau brassés sur le site d'exploitation (courant marin). C'est cette approche simplifiée qui a été utilisée dans cette étude.

2.2 Données utilisées pour l'étude

L'estimation de la quantité d'aluminium relargué par le système de PCAG a été réalisé à partir de la note de calcul de dimensionnement de protection cathodique fourni par BAC Corrosion à Hydroquest. Ce rapport a été fourni à l'Institut de la Corrosion par Hydroquest dans le but initial de réaliser une analyse critique du dimensionnement de protection cathodique. Les différentes informations données dans ce rapport (demande en courant, surfaces mises en jeu, facteur de dégradation du revêtement, etc...) ont permis d'estimer la vitesse de relargage d'aluminium dans le milieu. Une description d'une hydrolienne est présentée en Figure 2-1.

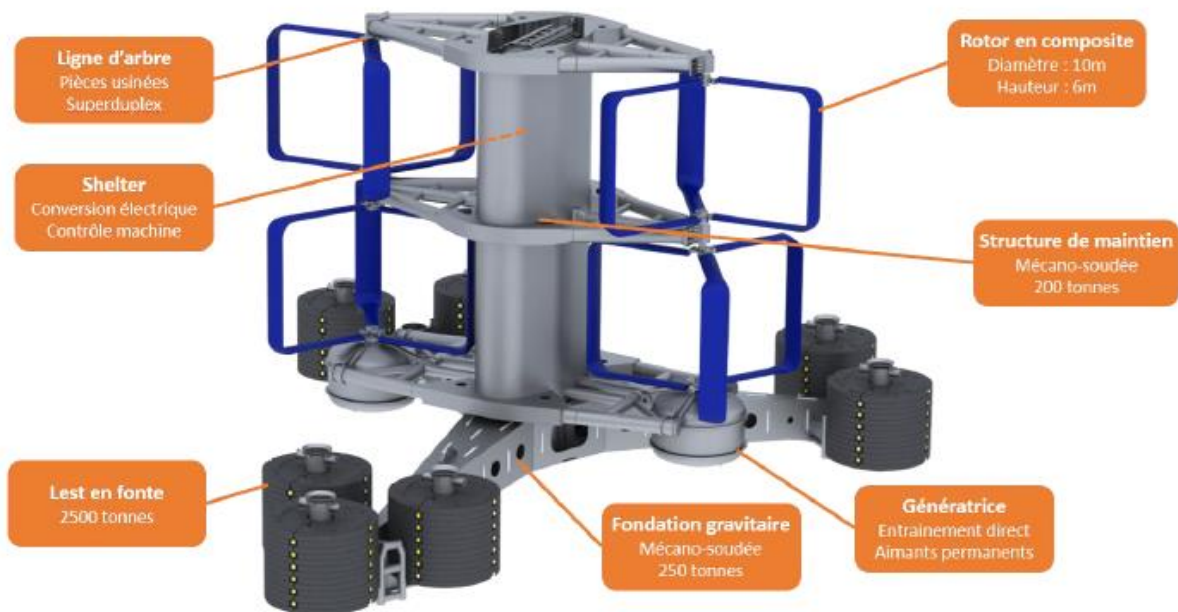


Figure 2-1: Illustration d'une hydrolienne Hydroquest

Dans un second temps, une estimation de la quantité d'aluminium diluée dans le milieu environnant a été réalisée en considérant les données d'entrées suivantes :

- Vitesse des courants au flot : 4,5 nœuds soit 2,3m/s
- Vitesse des courants au jusant : 4,5 nœuds soit 2,3m/s
- Surface du champ hydrolien : 50 000 m²

Ces données ont été fournis par Sinay. Les valeurs de courants moyennes données ci-dessous ont été fournis par Sinay à partir des informations fournies dans la Figure 2-2.

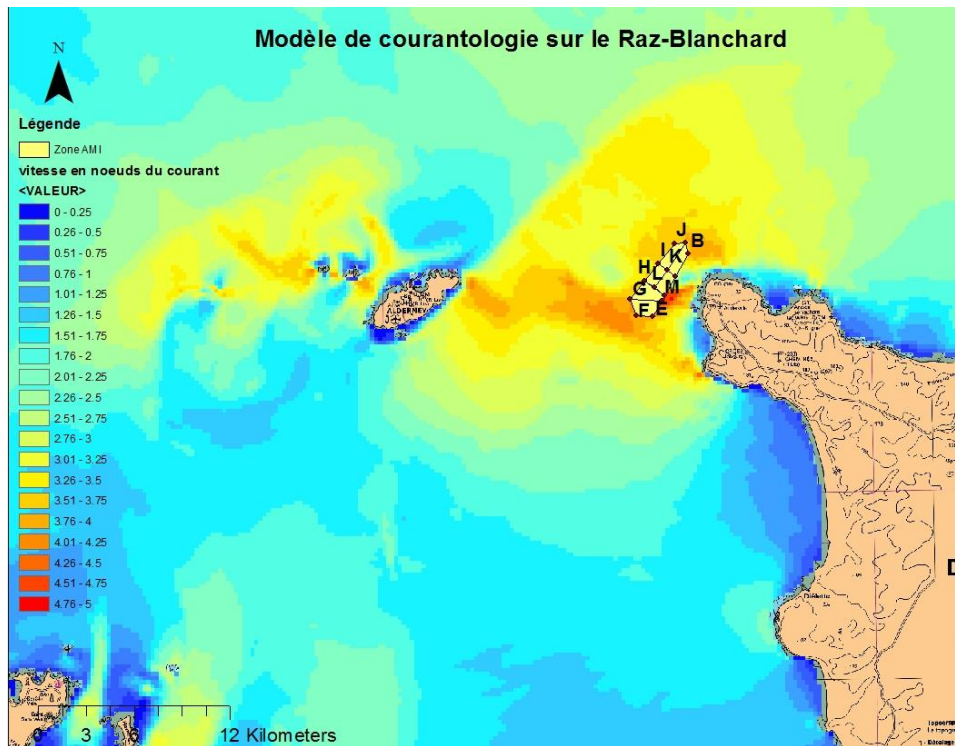


Figure 2-2: Modèle courantologie sur le Raz Blanchard

3 Résultats

3.1 Estimation de la quantité d'aluminium relargué par le système de protection cathodique

L'estimation de quantité d'aluminium relargué par le système de protection cathodique a été évalué à partir des informations données dans la note de calcul de protection cathodique réalisée par BAC Corrosion Control pour Hydroquest 2204364 - *NdC Hydrolienne-rev IC*. Les calculs ont été réalisés en considérant les surfaces métalliques mises en jeu dans l'installation, les facteurs de dégradation de revêtement et les demandes en courant recommandés par les normes utilisées pour le dimensionnement de protection cathodique en mer [1–3].

Selon les informations fournies dans le rapport de BAC, le système de peinture utilisé sur les surfaces extérieures est de type Classe III. Les facteurs de dégradation associés sont donnés ci-dessous :

- Facteur de dégradation initial : 2%
- Facteur de dégradation annuel : 1.2%

Les densités de courant retenues pour les aciers nus immergés sont dans la configuration des hydroliennes sont liées aux vitesses relatives des écoulements sur les structures. Selon les hypothèses considérées par BAC Corrosion, les densités de courant suivantes ont été sélectionnées :

- Zones immergées extérieures non peintes ($1\text{m/s} < V < 3\text{m/s}$) : 250 mA/m²
- Zones immergées intérieur nue ($V < 1\text{ m/s}$) : 80 mA/m²

Un résumé des surfaces mises en jeu, ainsi que des demandes en courant et facteurs de dégradation de revêtement associés sont présentés dans le Tableau 3-1. Des illustrations des différentes zones identifiées et le positionnement des anodes sur chaque élément sont présentées en annexe. A partir de ces informations il est possible d'évaluer les facteurs de dégradation, densités de courant et demande en courant total pour chaque année d'immersion. Ces informations sont résumées dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-1: Surfaces mise en jeu dans le système de protection cathodique, demandes en courant et facteurs de dégradation de revêtement associés

Eléments	Surface (m²)	Demande en courant (mA/m²)	Facteur de dégradation du revêtement
Tripode + Mât extérieur + Paniers	1120	250	2 % + (1.2%*X années)
Mât intérieur	60	80	100 % (surfaces non revêtues)
P1/P2/P3/M1/M2 extérieur	668	250	2 % + (1.2%*X années)
P1/P2/P3/M1/M2 Intérieur	1552	80	100 % (surfaces non revêtues)
Génératrices	50	250	2 % + (1.2%*X années)
Shelters	70	250	2 % + (1.2%*X années)

Les différents paramètres et données d'entrée nécessaires aux calculs de dimensionnement de la protection cathodique ont été donnés ci-dessus. La consommation d'anode est donnée par la loi de Faraday qui se traduit par l'équation (1) ci-dessous :

$$(1) M = Q \times I_{\text{tot}} \times T$$

Avec :

M : masse d'anode consommé (kg)

Q : Consommation massique pratique de l'Aluminium Indium fourni par BAC = 3.8 (kg/A.an)

T : durée (an)

I_{tot} : courant total débité par les anodes = Σ (Surfaces totales x facteur de dégradation x densités de courant)

Les pertes de masses anodiques annuelles pour 1 et 7 hydroliennes sont données dans le Tableau 3-3. Après 20 ans d'immersion la quantité d'aluminium relarguée par les anodes pour les 7 hydroliennes est estimés à 109 tonnes. Une représentation de l'évolution de la masse d'anode totale consommé est présentée en Figure 3-1.

Tableau 3-2: Facteurs de dégradation, densités de courant pour les surfaces intérieures et extérieures et courant total pour chaque année d'immersion

Année	Facteur de dégradation pour les surfaces peintes	Densités de courant pour les surfaces extérieures peintes (mA/m ²)	Densités de courant pour les surfaces intérieures peintes (mA/m ²)	Densités de courant pour les surfaces intérieures nu (mA/m ²)	Demande en courant total pour une hydrolienne (A)
0	0,02	5	1,6	80	138,5
1	0,032	8	2,56	80	144,224
2	0,044	11	3,52	80	149,948
3	0,056	14	4,48	80	155,672
4	0,068	17	5,44	80	161,396
5	0,08	20	6,4	80	167,12
6	0,092	23	7,36	80	172,844
7	0,104	26	8,32	80	178,568
8	0,116	29	9,28	80	184,292
9	0,128	32	10,24	80	190,016
10	0,14	35	11,2	80	195,74
11	0,152	38	12,16	80	201,464
12	0,164	41	13,12	80	207,188
13	0,176	44	14,08	80	212,912
14	0,188	47	15,04	80	218,636
15	0,2	50	16	80	224,36
16	0,212	53	16,96	80	230,084
17	0,224	56	17,92	80	235,808
18	0,236	59	18,88	80	241,532
19	0,248	62	19,84	80	247,256
20	0,26	65	20,8	80	252,98

Tableau 3-3: Pertes de masse anodique pour chaque année d'immersion

Année	Perte de masse anodique (kg/hydrolienne)	Perte de masse anodique (kg/7 hydroliennes)	Perte de masse anodique (kg/jour/hydrolienne)	Perte de masse anodique (kg/jour/7 hydroliennes)
0	526,30	3684,10	1,44	10,09
1	548,05	3836,36	1,50	10,51
2	569,80	3988,62	1,56	10,93
3	591,55	4140,88	1,62	11,34
4	613,30	4293,13	1,68	11,76
5	635,06	4445,39	1,74	12,18
6	656,81	4597,65	1,80	12,60
7	678,56	4749,91	1,86	13,01
8	700,31	4902,17	1,92	13,43
9	722,06	5054,43	1,98	13,85
10	743,81	5206,68	2,04	14,26
11	765,56	5358,94	2,10	14,68
12	787,31	5511,20	2,16	15,10
13	809,07	5663,46	2,22	15,52
14	830,82	5815,72	2,28	15,93
15	852,57	5967,98	2,34	16,35
16	874,32	6120,23	2,40	16,77
17	896,07	6272,49	2,45	17,18
18	917,82	6424,75	2,51	17,60
19	939,57	6577,01	2,57	18,02
20	961,32	6729,27	2,63	18,44
Total (kg)	15620	109340	-	-

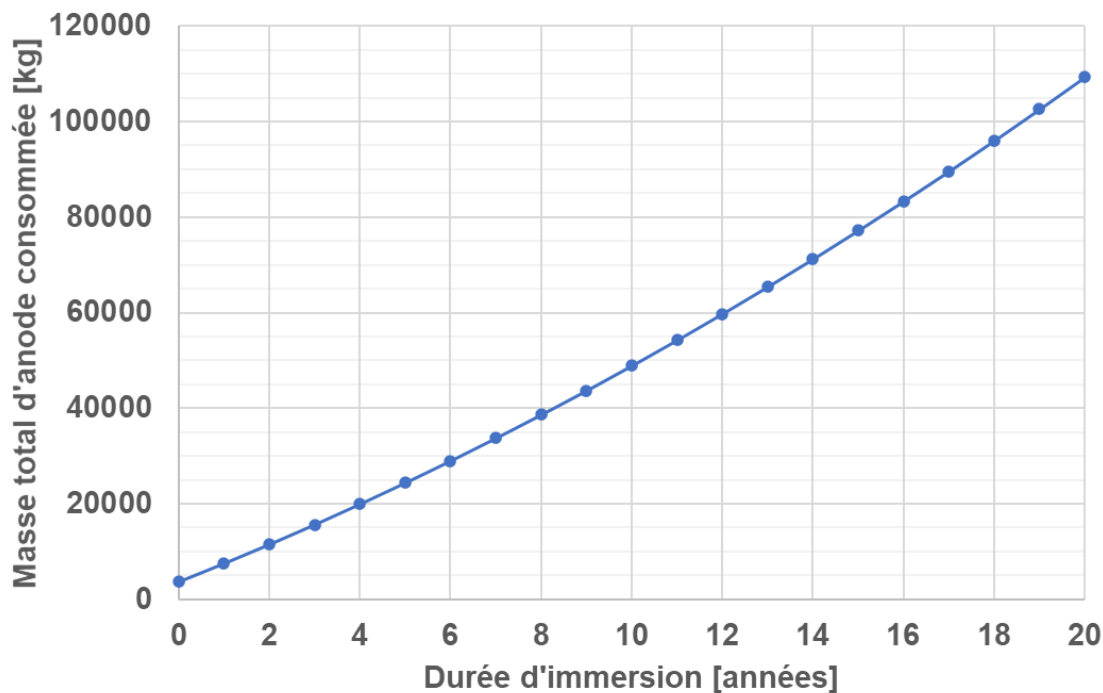


Figure 3-1: Evolution de la masse totale d'anode consommée par les systèmes de protection cathodique de 7 hydroliennes en fonction du temps

3.2 Estimation de la quantité d'anode diluée dans l'environnement

La dégradation des anodes sacrificielles peut conduire à un relargage dans le milieu naturel des matériaux qui les constituent : l'oxydation de l'aluminium entraîne une diffusion d'éléments métalliques essentiellement formes d'ions et d'oxydes. Si une partie de ces éléments reste en partie attachée à l'anode, une partie est transférée à l'environnement sous forme dissoute ou particulaire [4].

L'aluminium est toutefois majoritairement transféré dans l'eau de mer sous forme dissoute selon Millero et al. qui ont rapporté que le niveau de pH proche de 8,1 est favorable à la présence majoritaire d' $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ sous forme dissoute (68%), tandis que l'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ sous forme de particules représente 32% [5]. Une partie peut s'adsorber sur les particules présentes dans l'eau (MES), notamment lorsque la turbidité du milieu est importante. Cette fraction particulaire peut tomber au pied des hydroliennes et recouvrir la couverture sédimentaire.

Dans l'approche choisie pour cette étude, la quantité totale d'aluminium relarguée a été considérée. On considère donc que 100% du métal se dissout dans l'eau de mer, ce qui constitue le pire scénario pour l'environnement aqueux mais pas pour la zone sédimentaire du champ hydrolien.

Les anodes sont constituées à 95% d'aluminium. Seules les quantités d'aluminium ont été évaluées. Les quantités de zinc et autres métaux représentant 5% de la masse de l'anode, seront inférieures au moins d'un facteur 20 aux teneurs en aluminium. Or la teneur en zinc de l'eau de mer est déjà du même ordre que celle de l'aluminium hors silicates d'aluminium (kaolinite, illite...), les niveaux de relargage de zinc seront donc bien inférieurs à ceux de l'aluminium évalués ci-après.

L'aluminium est naturellement présent dans le milieu marin et sa concentration moyenne dans l'eau de mer varie de 2 à $150\mu\text{g/L}$ (hors silicates d'alumine présents dans les sédiments en suspension) [6]. Il

est important de noter que ce métal n'est pas inscrit dans la liste des substances prioritaires fixées par la Directive Cadre de l'Eau (DCE). Il ne fait pas l'objet de suivis dans le cadre des réseaux de surveillance de la qualité des milieux marins.

La quantité d'aluminium transférée au milieu marin par les anodes du parc a été approchée, en raisonnant par ordre de grandeur. Il s'agit d'une évaluation en premier approche, qui utilise des hypothèses a priori très conservatrices (c-a-d pire scénario).

Le raisonnement est mené à l'échelle d'un champ composé de 7 hydroliennes. La littérature indique que la plupart des éléments relargués par les anodes se dissolvent dans le milieu, une partie demeure attachée à la surface de l'anode sous forme oxydée, et une partie est susceptible d'être transférée dans l'environnement sous forme particulaire. **Il est pris ici l'hypothèse conservatrice que la totalité des éléments oxydés sont transférés dans l'environnement. La part d'aluminium dissoute ou particulaire n'a pas été distinguée.**

Concentration en aluminium total transféré dans l'eau

Comme décrit précédemment, en première approche et de manière conservatrice il a été considéré que tout l'aluminium oxydé est transféré dans l'eau. L'estimation de la quantité d'aluminium oxydé par jour, pour chaque année est donnée dans le Tableau 3-3. La surface globale du parc hydrolien spécifié par Sinay est de 50000 m². Pour le calcul il a été considéré que les hydroliennes sont disposés dans un carré de 224 x 224 m.

On considère ici que les courants de marée sont dominants sur l'ensemble de la colonne d'eau avec des courants variés entre 1 et 3 m/s en moyenne. Une vitesse de courant moyenne de 2,3m/s a été utilisée pour le calcul en accord avec les informations fournies par Sinay. Pour une marée de type semi-diurne avec un cycle de 12h, au bout de 6h, une particule d'aluminium relarguée par l'anode dans l'eau aura parcouru la distance de 49,68 km. 6h plus tard, à l'issue du jusant, cette même particule sera revenue à sa position initiale. Dans le même temps, une autre particule émise au début du jusant aura parcourue également 49,68 km dans le sens inverse. Sur un cycle de marée, ce sont donc 99,36 km qui auront été parcourus par des particules d'aluminium relarguées. Cette approche théorique décrite en Figure 3-2 permet de considérer le volume dans lequel l'aluminium est transporté et dilué en 12h.

A l'échelle du parc, on peut donc proposer un volume de dilution ayant une longueur de 0,223 + 99,36 km pour une largeur de 223m, soit une superficie de 23,2 km². En considérant une hauteur d'eau de 30m, le volume de dilution estimé est de 6,96 .10⁸ m³.

A partir des pertes de masses estimées dans le Tableau 3-3, on peut alors évaluer la concentration d'aluminium total relargué par les anodes dans le volume de dilution estimé sur 20 ans. Les valeurs sont données dans le Tableau 3-4. L'évolution de concentration en aluminium total relargué par les anodes dans le volume de dilution considéré est présenté en Figure 3-3 et montrent qu'**après 20 ans la concentration en aluminium induite par la PCAG dans le volume de dilution serait de 157 µg/L.**

A titre de comparaison, la quantité d'aluminium naturellement présente dans l'eau de mer sous forme dissoute est comprise entre 2 et 140 µg/L en moyenne. Il est rappelé que, en pratique, sur les 157µg/L estimés, une fraction seulement sera réellement dissoute.

Il est important de rappeler que le volume de dilution considéré ici, considère une vitesse de courant semblable au flot et au jusant. En pratique des vitesses de courants différents auront tendance à augmenter le volume de dilution et donc à abaisser les concentrations. L'approche considérée ici ne

prend pas en compte l'effet d'une diffusion des particules d'aluminium perpendiculairement au courant, ce qui tendrait également à augmenter le volume de dilution. Il est également rappelé que la totalité des oxydes produits ne sont pas dissous en eau de mer. Une partie non négligeable sera relarguée sous forme particulaire, réduisant encore la concentration en aluminium dissous dans l'eau. Toutefois, le relargage des particules d'aluminium (non dissoutes) pourrait être diffusé dans le volume de dilution et/ou s'accumuler localement dans les sédiments du champ hydrolien.

Il est important de signaler que cette approche permet d'estimer la quantité d'aluminium dans un volume de dilution donnée en considérant des hypothèses de diffusion simplifiées mais ne permet pas d'estimer la diffusion réelle des particules dans l'environnement. La diffusion des particules d'aluminium dans les sédiments n'a pas été considéré dans ce cas. De nombreux facteurs (vents, complexité des courants locaux, précipitations, etc...) peuvent influencer de manières plus ou moins significatives la diffusion des particules d'aluminium relargué dans l'environnement. Une étude de modélisation pourrait permettre d'affiner cette estimation.

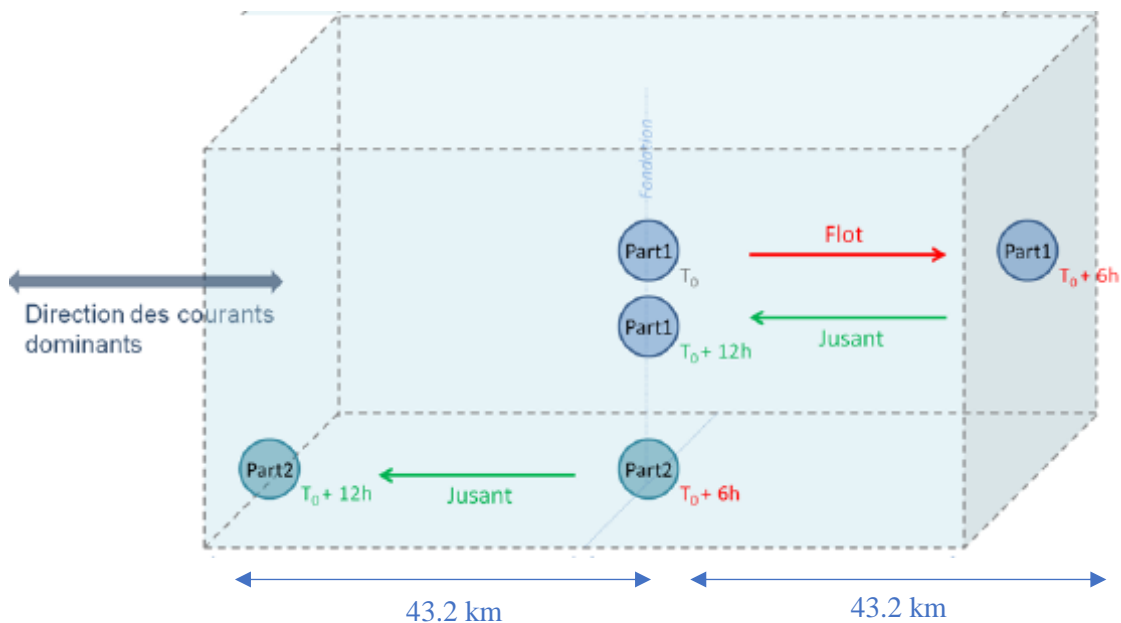


Figure 3-2: Description du déplacement des particules relarguées en fonction des courants de marées

Tableau 3-4: Concentration d'aluminium dans le volume de dilution en fonction des années

Années	Masse total cumulée relarguée par les anodes (kg)	Concentration d'aluminium total dans le volume de dilution (mg/m3)	Concentration d'aluminium total dans le volume de dilution (mg/l)
0	3684	5,29	0,005
1	7520	10,80	0,011
2	11509	16,53	0,017
3	15650	22,48	0,022
4	19943	28,65	0,029
5	24388	35,03	0,035
6	28986	41,64	0,042
7	33736	48,46	0,048
8	38638	55,50	0,056
9	43693	62,76	0,063
10	48899	70,24	0,070
11	54258	77,94	0,078
12	59769	85,86	0,086
13	65433	93,99	0,094
14	71249	102,35	0,102
15	77217	110,92	0,111
16	83337	119,71	0,120
17	89609	128,72	0,129
18	96034	137,95	0,138
19	102611	147,40	0,147
20	109340	157,06	0,157

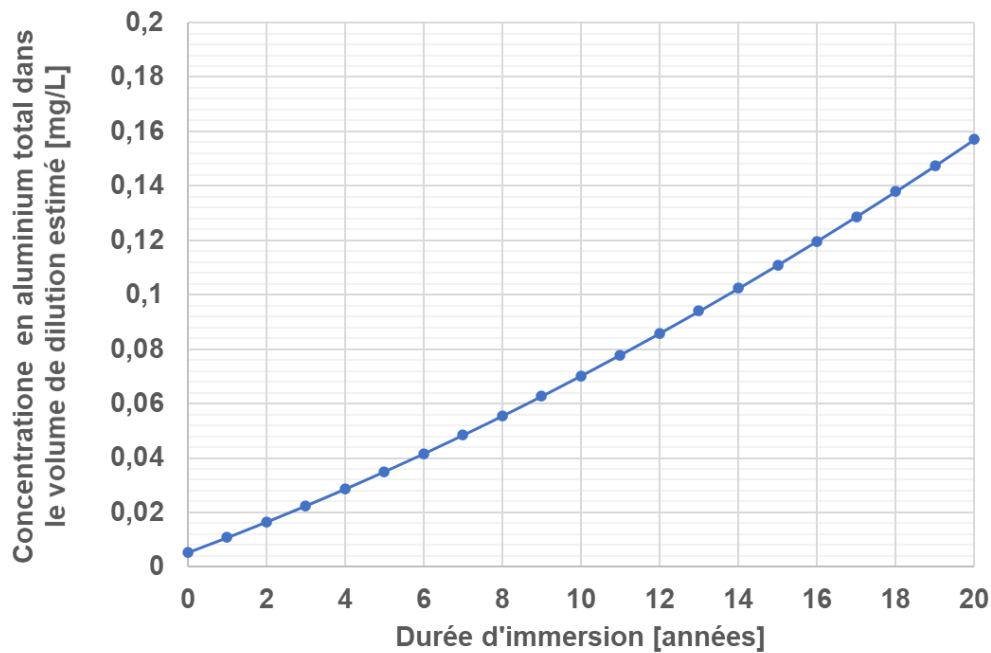


Figure 3-3: Evolution de la concentration en aluminium totale dans le volume de dilution estimé pour 7 hydroliennes en fonction du temps

3.3 Comparaison avec le projet EDF OpenHydro

L'approche considérée dans cette étude a été comparée avec le projet précédant de EDF – Open Hydro à partir d'informations fournis Sinay et du rapport « 2015_EIA_NH_Impacts » traitant des effets et impacts du projet OpenHydro. Une description comparative des projets OpenHydro et Hydroquest est présentée en Figure 3-4. Bien que des différences de structure significatives existent, les dimensions globales des hydroliennes sont du même ordre de grandeur pour les 2 structures.

D'un point de vue du système de protection cathodique, comme pour Hydroquest des anodes galvaniques Al/Zn/In étaient envisagées pour le modèle OpenHydro. Selon l'extrait d'un document fourni par Sinay et présenté en Figure 3-5, la quantité d'anode utilisée pour le stator et le rotor d'OpenHydro est inférieure à 5 tonnes par turbines pour une durée de 5 ans. 5 tonnes d'anodes étaient également envisagées pour la protection cathodiques de la fondation gravitaire pour une durée de 25 ans. Si l'on extrapole ces valeurs à une durée de vie comparable à celle prévue pour l'hydrolienne Hydroquest (20 ans), il était prévu d'utiliser 24 tonnes d'anodes pour protéger l'hydrolienne OpenHydro contre 17.36 tonnes pour l'hydrolienne Hydroquest. Selon les calculs réalisés par L'institut de la corrosion, 15.62 tonnes d'anodes seront consommées après 20 ans soit 90% de la masse totale des anodes mise en place. En appliquant le même pourcentage pour le projet OpenHydro, 21.6 tonnes d'anodes seraient consommées. Ces informations sont résumées dans le Tableau 3-5.

Une estimation des concentrations en aluminium dissous a également été réalisée dans le cadre du rapport « 2015_EIA_NH_Impacts » pour le projet OpenHydro. Des valeurs d'environ 5.10⁻⁹ g/L à l'échelle d'un cycle de marée ont été estimées. Cet ordre de grandeur est évalué pour un volume de dilution donné, qui ne prend pas en compte les effets de diffusion, d'agitation et de courantologie se produisant dans un milieu ouvert. **Aucune information supplémentaire n'ayant été fourni sur le**

volume de dilution ou la durée de vie considéré dans cette approche. Il n'est donc pas possible de comparer cette valeur à celles présentées dans la Figure 3-3. Toutefois des masses d'anodes plus importantes semblent avoir été envisagées pour l'hydrolienne OpenHydro. Par conséquent à condition environnementale égale (marée, courant, etc...) la quantité d'anode relarguée et concentrée dans l'environnement sera probablement plus faible pour le projet d'Hydroquest.



	Modèle Openhydro	Modèle Hydroquest
Vue d'ensemble générale		
Caractéristiques de chaque modèle d'hydroliennes		
Technologie	Hydrolienne à flux axial à centre ouvert avec carénage	Hydrolienne à flux transverse
Axe des rotors	Horizontal	Vertical
Type de courant électrique de sortie	Alternatif (AC)	Alternatif (AC)
Puissance unitaire	2 MW	2,5 MW
Hauteur de l'hydrolienne	≤ 21 m	≤ 21 m
Largeur de la fondation gravitaire	≤ 45 m	≤ 30 m
Longueur de la fondation gravitaire	≤ 45 m	≤ 34 m
Diamètre extérieur de la tuyère	16 m	N/A
Longueur de la tuyère	≤ 10 m	N/A
Masse de la turbine (hors fondation)	≤ 500 t	≤ 250 t
Masse de la fondation	≤ 1500 t	≤ 2800 t
Dimension rotor	12 m de diamètre	6m de haut 10m de diamètre
Poids en air turbine / hydrolienne	500Tonnes	200 Tonnes
Matériau des pales	Composite	Composite
Type de Fondation	Gravitaire	Gravitaire
Nombre de pied par fondation	3	3
Nombre de lest par turbine	3	7
Caractéristique de connexion et d'export		
Nombre de hub	1	1
Superficie impactée par hub	<5m ²	<10m ²
Câble d'export et raccordement inter-hydroliennes – Surface totale occupée	<32 000m ²	<32 000m ²

Figure 3-4: Description comparative des hydrolienne OpenHydro et Hydroquest

2.1.1.7. Système de protection cathodique

La protection des hydroliennes contre la corrosion marine est assurée par l'application de peintures anticorrosion sur les composants externes de la turbine, combinée à l'installation d'anodes sacrificielles qui garantissent la protection cathodique de l'ouvrage.

Les anodes positionnées sur le stator et le rotor représentent une masse totale inférieure à 5 tonnes par turbine, et pourront être remplacées à l'occasion des phases d'entretien et maintenance, tous les 5 ans. Celles installées sur la fondation gravitaire auront une durée de vie de 25 ans, et représentent également une masse totale inférieure à 5 tonnes par turbine. L'ensemble des anodes est composé d'alliage Al-Zn-In-Si (95% Al; 5% Zn; autres métaux en quantité négligeables). Une peinture de protection antifouling de type Sealion est appliquée sur une surface totale inférieure à 700 m² par turbine, conformément à la norme NORFOK M-501.

Figure 3-5: Extrait d'un rapport fourni par Sinay décrivant le système de protection cathodique utilisé pour le projet OpenHydro

Tableau 3-5: Comparatif des masses d'anodes utilisées et consommées pour les hydroliennes OpenHydro et Hydroquest

	Modèle OpenHydro	Modèle Hydroquest
Quantité d'anode mis en place sur l'hydrolienne [kg]	24	17.36
Estimation de la masse d'anode consommé et relargué dans l'environnement après 20 ans [kg]	21.6	15.62

4 Conclusions

Une estimation de la quantité d'aluminium d'anode relarguée par le système de protection cathodique appliqué à un champ hydrolien situé dans la zone du raz Blanchard.

- A partir des données fournies par la note de calcul de BAC Corrosion, la quantité d'aluminium relargué par le système de protection cathodique du champ hydrolien est de 10kg/jour en début d'exploitation et de 18kg/jour après 20 ans d'exploitation. LA quantité totale d'aluminium relargué sur 20 ans est estimée à 109 tonnes.
- En considérant une surface de champ hydrolien de 50000 m² et une vitesse de courant de 2.3 m/s (au flot et au jusant) la concentration d'aluminium total provenant du système de protection cathodique dans le volume de dilution (évalué à 6.96 10⁸ m³) est estimée à 157 µg/L après 20 ans.
- A partir des informations fournies par Sinay, la quantité d'anode relargué par les anodes des hydroliennes hydroquest seront moins importantes que celle envisagé dans le projet EDF OpenHydro

Il est important de signaler que cette approche permet d'estimer la quantité d'aluminium totale dans un volume de dilution donnée en considérant des hypothèses de diffusion simplifiées mais ne permet pas d'estimer la diffusion réelle des particules dans l'environnement. De nombreux facteurs (vents, complexité des courants locaux, précipitations, etc...) peuvent influencer de manières plus ou moins significatives la diffusion des particules d'aluminium relargué dans l'environnement. Une étude de modélisation pourrait permettre d'affiner cette estimation.

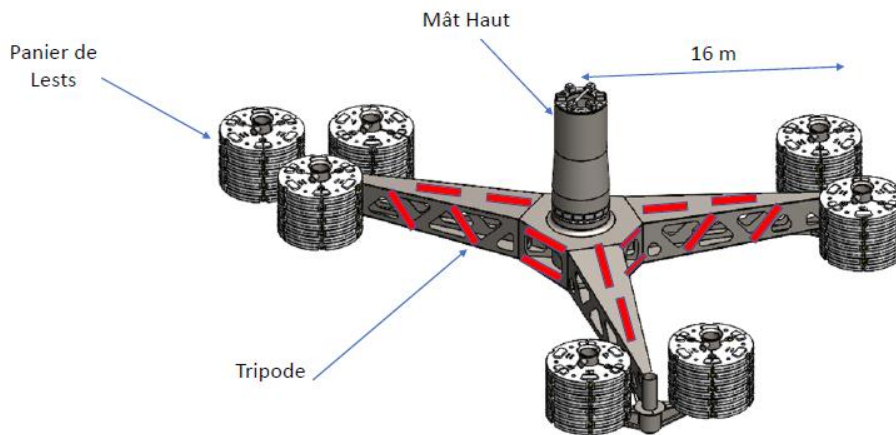
5 Références

- [1] DNV-RP-B401, Cathodic protection design, 2005.
- [2] NF-EN-13174, Protection cathodique des installations portuaires, 2001.
- [3] NF-EN 12473, Principes généraux de la protection cathodique en eau de mer, 2000.
- [4] S. Pineau, A. Mao, D. Masson, J. Cruzillac, C. Caplat, transfert d'éléments constitutifs d'anodes sacrificielles Al-In vers l'environnement, in: 5ème Journée d'Aix La Prot. Cathod., 2011.
- [5] F. Millero, R. Woosley, B. DiTrollo, J. Waters, Effect of Ocean Acidification on the Speciation of Metals in Seawater, *Oceanography*. 22 (2009) 72–85. doi:10.5670/oceanog.2009.98.
- [6] A. Mao, M.-L. Mahaut, S. Pineau, D. Barillier, C. Caplat, Assessment of sacrificial anode impact by aluminum accumulation in mussel *Mytilus edulis*: A large-scale laboratory test, *Mar. Pollut. Bull.* 62 (2011) 2707–2713. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.09.017.
- [7] C. Rousseau, F. Baraud, L. Leleyter, O. Gil, Cathodic protection by zinc sacrificial anodes: Impact on marine sediment metallic contamination, *J. Hazard. Mater.* 167 (2009) 953–958. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.01.083.
- [8] J. Deborde, P. Refait, P. Bustamante, C. Caplat, O. Basuyaux, A.-M. Grolleau, M.-L. Mahaut, C. Brach-Papa, J.-L. Gonzalez, S. Pineau, Impact of Galvanic Anode Dissolution on Metal Trace Element Concentrations in Marine Waters, *Water, Air, Soil Pollut.* 226 (2015) 423. doi:10.1007/s11270-015-2694-x.
- [9] A.B. Rees, A. Gallagher, S. Comber, L.A. Wright, An analysis of variable dissolution rates of sacrificial zinc anodes: a case study of the Hamble estuary, UK, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24 (2017) 21422–21433. doi:10.1007/s11356-017-9762-2.
- [10] P. Bird, S.D.W. Comber, M.J. Gardner, J.E. Ravenscroft, Zinc inputs to coastal waters from sacrificial anodes, *Sci. Total Environ.* 181 (1996) 257–264. doi:10.1016/0048-9697(95)05025-6.
- [11] C. Gabelle, F. Baraud, L. Biree, S. Gouali, H. Hamdoun, C. Rousseau, E. van Veen, L. Leleyter, The impact of aluminium sacrificial anodes on the marine environment: A case study, *Appl. Geochemistry*. 27 (2012) 2088–2095. doi:10.1016/j.apgeochem.2012.07.001.
- [12] C. Caplat, R. Oral, M.-L. Mahaut, A. Mao, D. Barillier, M. Guida, C. Della Rocca, G. Pagano, Comparative toxicities of aluminum and zinc from sacrificial anodes or from sulfate salt in sea urchin embryos and sperm, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 73 (2010) 1138–1143. doi:10.1016/j.ecoenv.2010.06.024.

6 Annexes



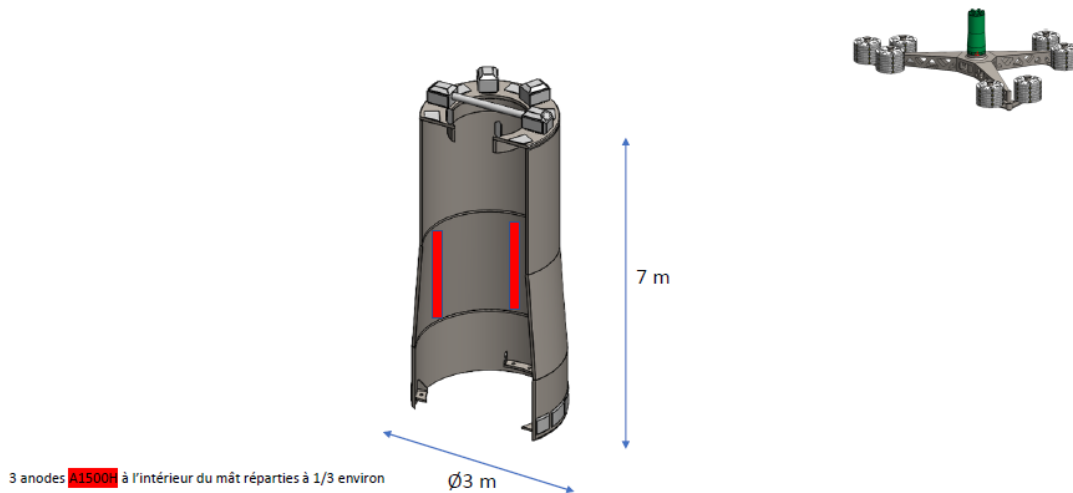
Tripode



23 anodes **A1500H** à placer sur le tripode

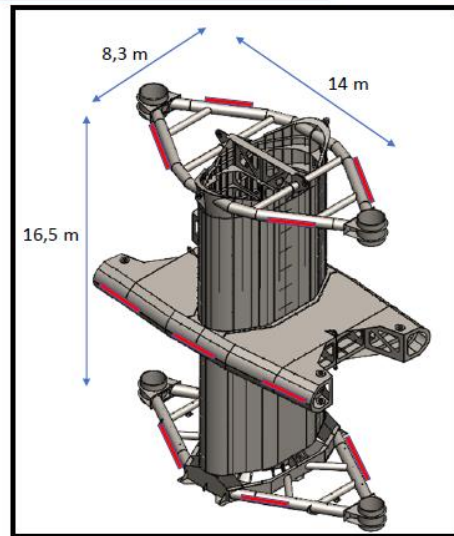
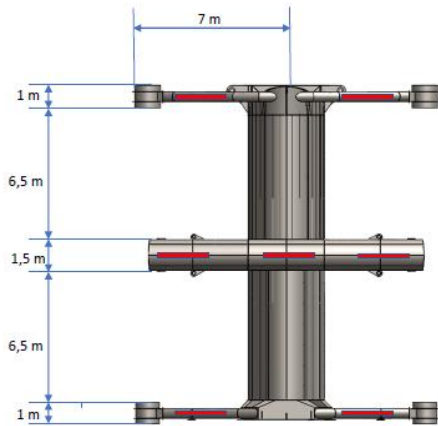


Intérieur Mât Haut





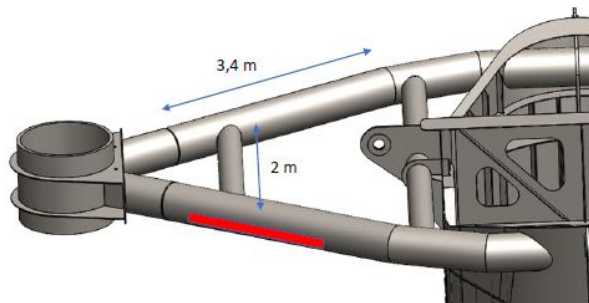
P1 P2 P3 M1 M2 Extérieur



14 anodes type **A1500**, réparties sur P1, P2 et P3



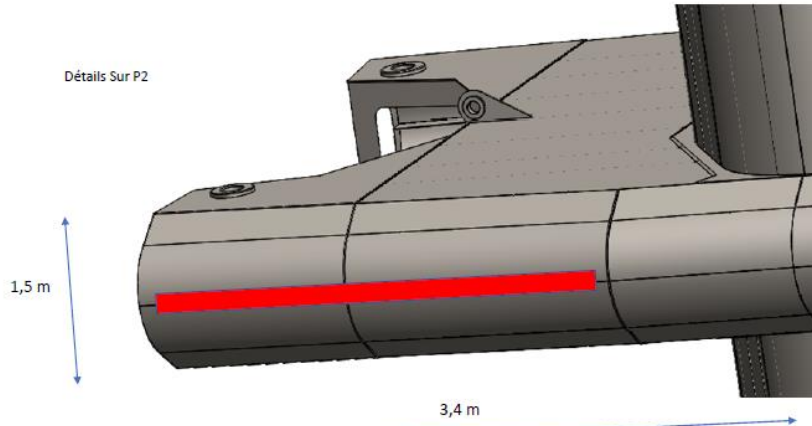
P1 P2 P3 M1 M2 Extérieur - Détail



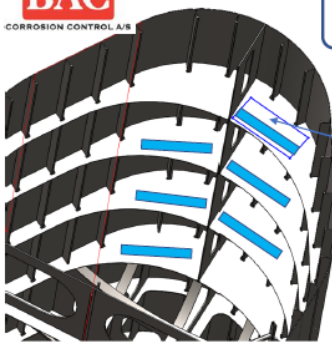
Détails Sur P1



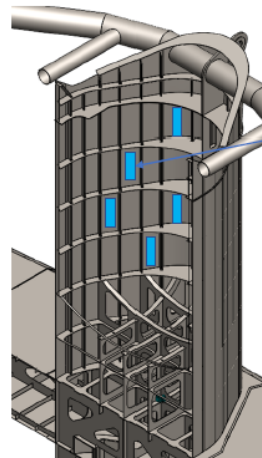
P1 P2 P3 M1 M2 Extérieur - Détail



P1 P2 P3 M1 M2 Intérieur



700x300

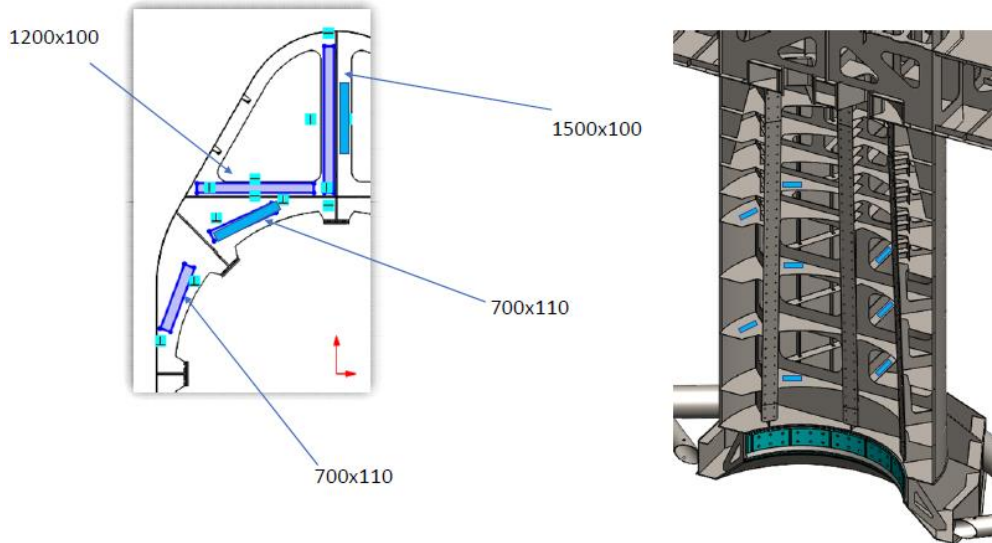


1000x400

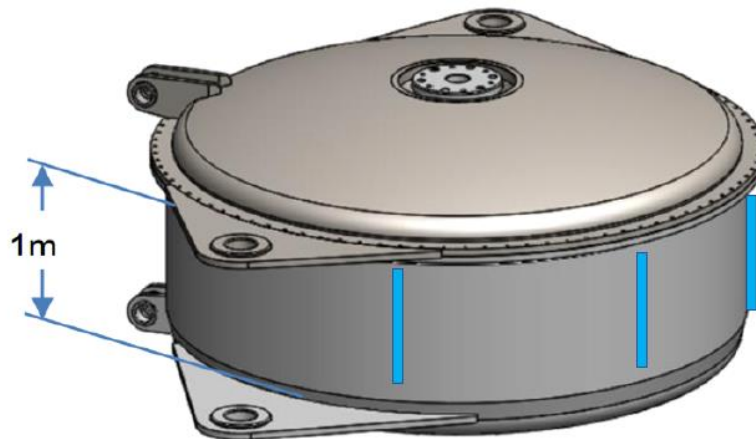
439 Anodes **A248H** (longueur 725mm) à répartir à l'intérieur de M2, P2 et M1 : un ratio va devoir être fait pour un respect des anodes nécessaires.



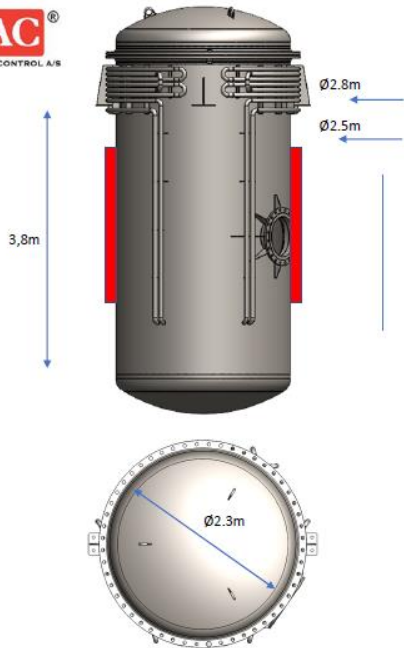
P1 P2 P3 M1 M2 Intérieur - Détail



Génératrices



7 Anodes A248H (longueur 725mm) à répartir sur le contour de chaque génératrice



Shelters



Encombrement max = 300mm

2 anodes A1500H par shelter
Epaisseur Anodes = 160mm

