

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2020

—

SCIENCES PHYSIQUES ET CHIMIQUES EN LABORATOIRE

(Classes de terminale STL)

ÉPREUVE D'ADMISSIBILITÉ

Durée : 5 heures

—

*L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.
L'usage de la calculatrice sans mémoire « type collègue » est autorisé.*

Consignes aux candidats

- Ne pas utiliser d'encre claire
- N'utiliser ni colle, ni agrafe
- Numéroté chaque page en bas à droite (numéro de page / nombre total de pages)
- Sur chaque copie, renseigner l'en-tête + l'identification du concours :

Concours / Examen : CGL

Epreuve : 101

Matière : SPCL

Session : 2020

Concours général des lycées

Session 2020

SCIENCES PHYSIQUES ET CHIMIQUES EN LABORATOIRE

(Classes de terminale STL)

Durée : 5 heures

Si au cours de l'épreuve une candidate ou un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre pour cela.

Dès que ce sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet. Ce sujet comporte 33 pages numérotées de 1 à 33. L'annexe page 33 est un document réponse à rendre avec la copie.

Le sujet comporte deux parties indépendantes. Les candidats doivent rédiger chacune de ces deux parties sur des feuilles différentes.

Il est souhaitable qu'un futur lauréat du concours général montre sa maîtrise dans les différents domaines de la chimie et de la physique. Il lui est donc fortement conseillé d'aborder toutes les parties.

L'usage de la calculatrice est autorisé.

Les porte-conteneurs

Les porte-conteneurs sont des navires marchands destinés au transport de conteneurs standardisés. Ils sont utilisés depuis les années 1970 et sont aujourd'hui un maillon essentiel du commerce mondial. La flotte mondiale de porte-conteneurs compte actuellement environ 5000 navires, dont la capacité de transport ne cesse de croître. L'explosion du commerce mondial depuis les années 1990 explique cette croissance de la capacité de transport, mais cela ne va pas sans causer des soucis de pollution.

Dans ce sujet, nous commençons par nous intéresser au principe du positionnement des navires par GPS, l'exploitation des données du GPS permettant l'étude des trajectoires des porte-conteneurs. Nous abordons ensuite la propulsion du navire par un moteur Diesel. Enfin nous nous intéresserons à l'acier composant les conteneurs et à l'impact de la salinité de l'eau de mer sur la corrosion de cet acier.

Plan du sujet

Première partie : le porte-conteneurs

- A. Positionnement d'un navire par GPS
- B. Trajectoire et mouvement d'un navire
- C. Propulsion d'un navire par un moteur Diesel
 - Annexe 1 : Mouvement du Navire AL JMELIYAH
 - Annexe 2 : Données constructeur sur le moteur RTA96C

Deuxième partie : les conteneurs

- A. La salinité de l'eau de mer
- B. L'acier CORTEN et le phénomène de corrosion
- C. L'atmosphère saline corrosive
 - Document n°1 : Extrait de fiches de données de sécurité (FDS) d'espèces chimiques
 - Document n°2 : La corrosion atmosphérique de l'acier
 - Document n°3 : Définition de l'acier CORTEN
 - Document n°4 : Exemples de caractéristiques d'un acier CORTEN-A ou B
 - Document n°5 : Données pour analyse de spectre RMN du proton

Document réponse à rendre avec la copie

La première partie comporte principalement des questions de physique qui sont numérotées de P1 à P27. Les questions de chimie correspondent principalement à la deuxième partie et sont numérotées de C1 à C42. Dans le barème de l'épreuve, il est accordé la même importance à la physique et à la chimie.

Les différentes parties et sous-parties sont indépendantes les unes des autres dans une large mesure.

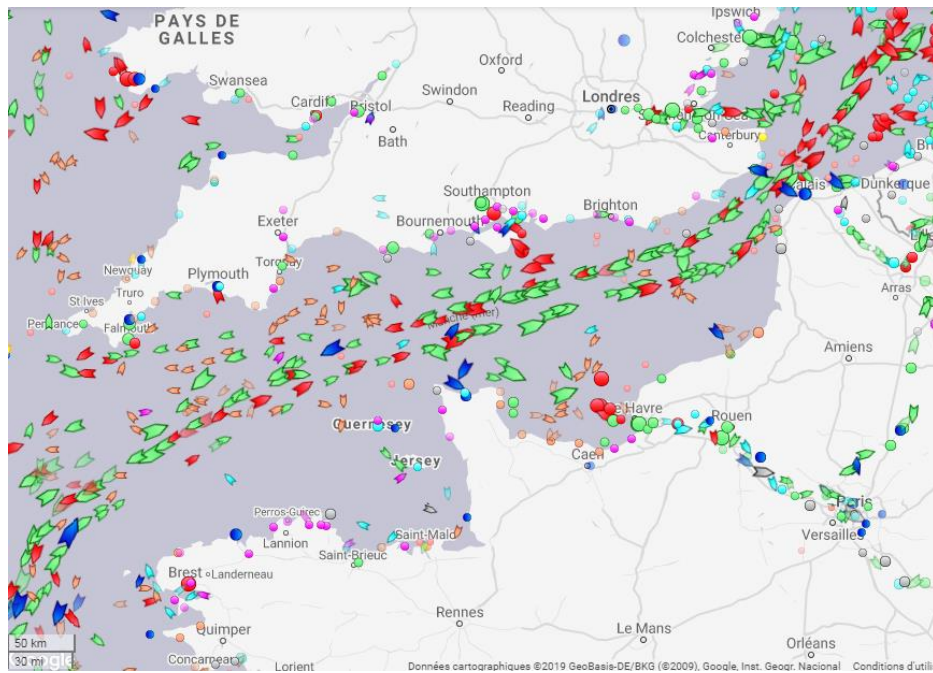
Un porte-conteneurs est un navire capable de transporter des conteneurs de taille standardisée. Il existe aujourd'hui deux tailles standards : les conteneurs de 20 pieds et ceux de 40 pieds (1 pied = 30,48 cm).



Le Maersk Elba, un porte-conteneurs récent (2011) d'une capacité de chargement de 13 830 EVP (Equivalent Vingt Pieds : nombre de conteneurs de 20 pieds de long)

Le GPS (pour *Global Positioning System*) est un système de positionnement par satellites. Il est mis en place par le département de la défense des États-Unis d'Amérique à partir de 1973, ouvert à l'utilisation civile depuis 2000. Le principe de fonctionnement repose sur la trilatération de signaux électromagnétiques synchronisés émis par les satellites. Pour assurer la précision du positionnement, le système GPS utilise des technologies sophistiquées : horloges atomiques embarquées, compensation d'effets relativistes, mise en place de stations d'observation et de synchronisation.

Les puces GPS permettant l'utilisation du signal émis par les satellites sont aujourd'hui omniprésentes (3,6 milliards de puces GPS), des appareils d'aide à la conduite automobile jusqu'aux smartphones. L'exploitation des données GPS des navires alimente des sites comme <http://marinetraffic.com> qui permettent le suivi en temps quasi réel des routes suivies par les navires.



Capture d'écran marine traffic montrant le trafic en Manche. Cliquer avec la souris sur un navire permet d'obtenir des informations (vitesse, cap) (source : <http://marinetraffic.com>)

AL JMELIYAH 15.4 kn - 30 Sep 18:24 UTC

Guernsey
Jersey

Brest
Rennes

Nantes
Tours

La Rochelle
Limoges

Bordeaux

Toulon

50 NM

Past Track Forecast

AL JMELIYAH

Vessel Voyage Position Port Calls

Container Ship | MH

SHANGHAI [CN] **LE HAVRE [FR]**

ATD: 5 Sep 18:19 UTC+8 ETA: 1 Oct 14:00 UTC+2

Travelled: 26days

5' ago | Underway using Engine | 3 kn

Call sign	IMO	MMSI
V7HM5	9732357	538005848
Year built	Length x breadth	
2017	368m x 51m	
Gross tonnage	Deadweight	
153148	150000 t	

Flag: Marshall Is

TRACK LOCATION MY FLEET NOTIFICATIONS PHOTO

Données obtenues pour le porte-conteneurs AL JMELIYAH via l'application mobile du site <http://marinetraffic.com>

A. Positionnement du navire par GPS

1. Généralités

Le principe du positionnement GPS repose sur la mesure de la distance entre le récepteur GPS et plusieurs satellites émetteurs. La distance est calculée à partir du temps mis par un signal porté par une onde électromagnétique pour parcourir cette distance. La position de chaque satellite dans l'espace et l'heure exacte de transmission du message sont connues avec une très grande précision par le récepteur.

Dans son ouvrage *Guide pratique du GPS*, Paul Correia écrit :

*Grâce à la distance et la position du satellite, il est possible de tracer un cercle imaginaire, ou « cercle de positionnement », sur la surface de la Terre sur lequel se trouve obligatoirement le récepteur. Comme le montre la **figure 1**, l'intersection de plusieurs de ces cercles de positionnement permet de connaître la position exacte du récepteur.*

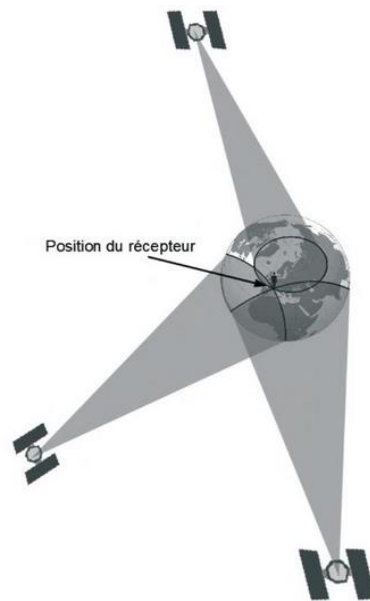


Figure 1 : Principe de positionnement des satellites

P1. Les satellites constituant le système GPS émettent leurs signaux à des fréquences f_1 et f_2 , ayant pour valeurs respectivement $f_1 = 1575,42$ MHz et $f_2 = 1227,60$ MHz. Citer le domaine du spectre du rayonnement électromagnétique dans lequel se situent ces deux fréquences. Calculer les longueurs d'onde dans le vide correspondantes.

P2. Dans son ouvrage, Paul Correia écrit également : « *Le principal problème consiste à mesurer le délai avec une grande précision, lorsqu'on sait qu'une erreur d'un millionième de seconde provoque une erreur de 300 mètres sur la position* ».

Commenter de manière raisonnée cette affirmation.

P3. Les satellites composant le système GPS sont situés en orbite quasi-circulaire à une altitude de 20 200 km. La période de révolution est de 11 h 58 min 2 s. Calculer la vitesse moyenne d'un satellite sur cette orbite. On rappelle que la valeur du rayon de la Terre vaut 6 400 km.

L'horloge embarquée dans le satellite subit les effets de la relativité restreinte et en particulier la dilatation des temps. Cette théorie nous apprend que les horloges atomiques des satellites, en mouvement à grande vitesse autour de la Terre, battent plus lentement que

celles restées immobiles au sol. À partir du lancement du satellite, un décalage s'installe au fil des jours entre le temps T_{rel} mesuré à bord du satellite et le temps T_0 mesuré sur la Terre : les horloges placées dans le satellite et au sol se désynchronisent.

Ces effets relativistes peuvent être quantifiés ; on appelle ΔT_{rel} la correction relativiste à apporter sur le temps de parcours du signal entre le satellite et le récepteur à la surface de la Terre et T_0 le temps écoulé depuis la synchronisation entre l'horloge placée dans le satellite et celle restée au niveau du sol, la relation entre ces deux grandeurs est donnée par :

$$\Delta T_{rel} = \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} T_0$$

P4. *Vespucci*, le premier satellite du GPS III de haute précision a été lancé le 23 décembre 2018. Les horloges sont synchronisées au moment du lancement. On repère la position d'un objet placé à la surface de la Terre par GPS à la date du 11 mars 2020. Calculer la correction relativiste à apporter sur le temps de parcours du signal entre le satellite et le récepteur à la surface de la Terre et estimer s'il y a lieu de tenir compte de cette correction pour assurer le bon fonctionnement du système GPS en supposant qu'aucune nouvelle synchronisation entre les horloges n'a été effectuée depuis le lancement.

2. Expérience de modélisation de GPS

Afin de mieux comprendre le fonctionnement du système GPS, des élèves de terminale STL-SPCL souhaitent construire une maquette simplifiée de GPS. Pour cela, ils utilisent deux émetteurs ultrasonores (représentant les satellites) et deux récepteurs ultrasonores fixés sur l'objet dont on veut repérer la position. Ces deux récepteurs sont reliés à un système d'acquisition. Les deux récepteurs modélisent le récepteur GPS.

Les deux émetteurs sont alimentés par le même générateur de salves et envoient au même instant t_0 une impulsion ultrasonore de durée 5 ms, en direction des récepteurs. On suppose que sur la distance parcourue, l'atténuation est négligeable.

Dans la suite, on considèrera leur vitesse de propagation égale à $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

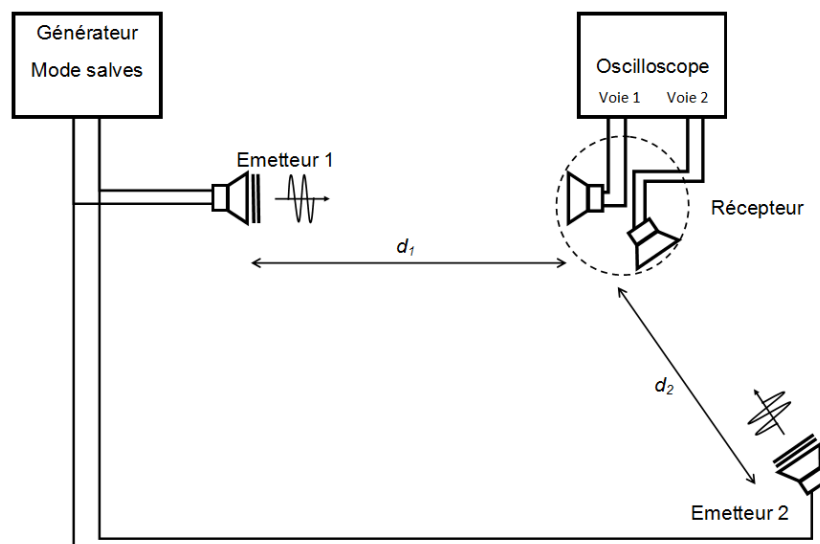


Figure 2 : Expérience de modélisation du GPS, schéma de principe (expérience 1)

P5. Donner la gamme de fréquences des ondes ultrasonores. Décrire leur nature.

P6. Estimer alors le nombre de périodes constituant la salve émise.

Les récepteurs sont constitués d'un capteur et d'un conformateur électronique qui délivre un signal binaire : -1 V en absence de réception, +1V en présence d'une onde reçue.

P7. Les signaux de la figure 3 sont observés sur un oscilloscope. La date $t_0 = 0$ correspond à l'émission simultanée du signal par les deux émetteurs. Montrer que la distance entre l'émetteur 1 et le récepteur s'exprime par la relation $d_1 = c(t_1 - t_0)$. Cette mesure constitue la mesure 1. En déduire l'expression de d_2 . Calculer numériquement d_1 et d_2 .

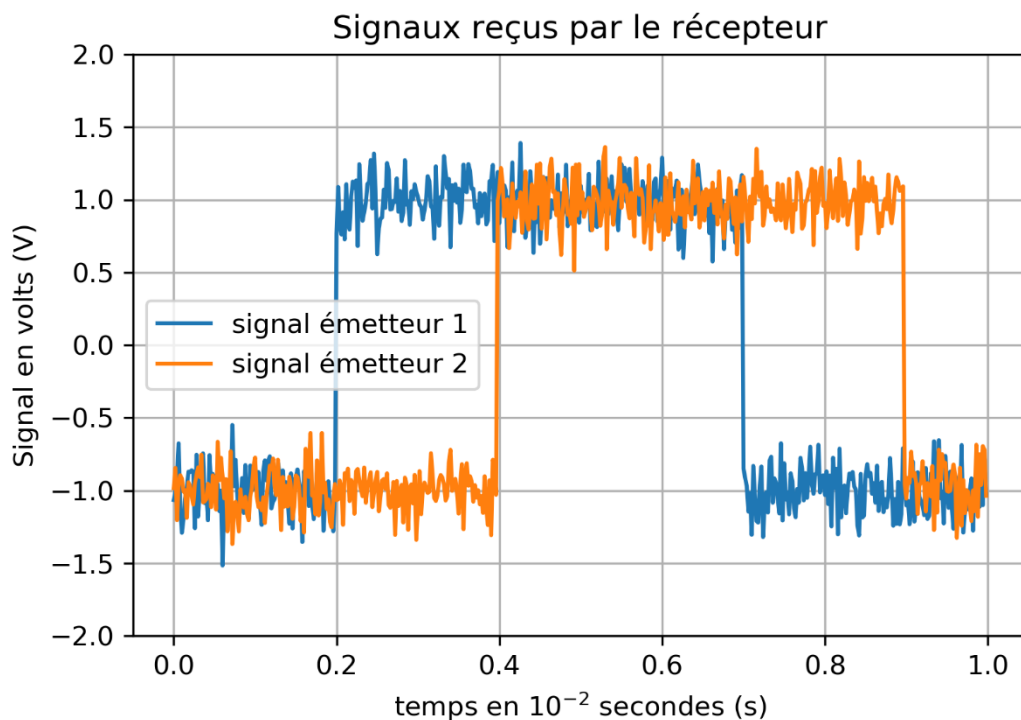


Figure 3 : Signaux reçus par l'oscilloscope dans l'expérience 1

P8. Sur le **document à rendre avec la copie**, les deux émetteurs sont positionnés. En exploitant la valeur de d_1 déterminée à la question précédente, représenter l'ensemble des positions compatibles avec cette valeur. Procéder de la même manière avec d_2 et déterminer les positions possibles du récepteur. Expliquer quelle modification il faudrait apporter à la maquette pour déterminer, parmi les positions possibles, celle du récepteur.

P9. En généralisant ce cas à trois dimensions, déterminer le nombre minimum de satellites permettant de déterminer la position d'un récepteur GPS.

P10. Expliquer l'intérêt d'avoir un nombre de satellites plus grand que le minimum nécessaire.

B. Trajectoire et mouvement d'un navire

P11. Dans le document en début d'énoncé, la vitesse du navire AL JMELIYAH est indiquée en nœuds ou knots en anglais (kn).

On donne la conversion suivante : 1 nœud = 1,852 km·h⁻¹. Exprimer la vitesse du navire à cet instant en km·h⁻¹, puis en m·s⁻¹.

Plusieurs captures d'écran pointant la position du navire AL JMELIYAH le 30/09/2019 entre 16:18 et 16:43 UTC sont données en **annexe 1**.

P12. Caractériser le mouvement du navire AL JMELIYAH le 30/09/2019 entre 16:18 et 16:43 UTC.

Le pointage des positions du navire AL JMELIYAH, le 01/10/2019 entre 08:38 et 9:09 UTC est reporté dans le tableau suivant.

Heure UTC	08:38	08:41	08:44	08:47	08:50	08:53	08:55	08:58	09:01	09:04	09:06	09:09
Vitesse (m·s ⁻¹)	4,89	4,84	4,73	4,68	4,63	4,63	4,58	4,53	4,48	4,37	4,32	4,27

P13. En vous appuyant sur la démarche de votre choix (construction graphique ou calcul), montrer que le mouvement est uniformément décéléré.

P14. En déduire la résultante des forces horizontales appliquée au navire à ce moment, sachant que la jauge brute en tonnes (*gross tonnage* en anglais) représente environ 80% de la masse totale du navire.

Lorsque le navire se déplace dans l'eau, il subit une force de résistance à l'avancement due principalement aux frottements du fluide sur la carène et à la vague d'étrave. Sa forme générale s'écrit $F = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C \cdot v^2$, avec ρ la masse volumique de l'eau, S la surface mouillée, C un coefficient de traînée (sans dimension) et v la vitesse. Pour un porte-conteneurs, la valeur du produit $S \cdot C$ peut être estimée à $0,2 \cdot 10^3$ en unités du système international.

P15. Estimer la valeur numérique de la force de résistance à l'avancement vers 9h00 UTC le 01/10/2019 et en la comparant à la résultante des forces calculée à la question précédente, indiquer si la propulsion du navire était encore en marche.

C. Propulsion du navire par un moteur diesel

L'objectif d'un moteur thermique est de transformer de l'énergie chimique associée à la combustion du carburant en énergie mécanique pour faire avancer le bateau. Une partie de l'énergie chimique n'est pas convertie en énergie mécanique, ce qui constitue les pertes énergétiques.

Le moteur Diesel est un moteur à combustion interne dont l'allumage est spontané lors de l'injection du carburant, par phénomène d'auto-inflammation lié aux températures élevées dans la chambre de combustion.

L'avantage mécanique des moteurs Diesel est le couple important produit qui permet, pour une vitesse de rotation du moteur donnée, de produire plus de puissance. L'autre avantage

des moteurs Diesel est leur rendement, plus important que les moteurs à essence. Ils sont par contre émetteurs de plus de particules.

Le moteur Diesel peut être à deux temps (surtout sur les navires) ou à quatre temps.

Certains moteurs Diesel lents à deux temps atteignent 100 000 ch. Le porte-conteneurs Emma Mærsk est équipé d'un moteur Wärtsilä RT-flex96C 14-cylindres dont les caractéristiques sont présentées dans l'**annexe 2**.

La vitesse relativement lente de déplacement des pistons permet une usure limitée dans le temps et un gain en coût d'entretien.

1. Fonctionnement d'un cycle Diesel

Dans son principe de fonctionnement, un moteur thermique ne stocke pas d'énergie, c'est un convertisseur qui permet le transfert de l'énergie dégagée lors de la combustion du carburant en énergie thermique transférée au milieu extérieur et en travail mécanique. Pour permettre ces différents échanges, le gaz contenu dans le cylindre subit un cycle de transformations qui vont être étudiées.

Pour représenter les transformations de ce cycle, l'évolution de la pression du gaz est représentée en fonction du volume du cylindre. Le cycle Diesel réel présente l'allure donnée **figure 4**.

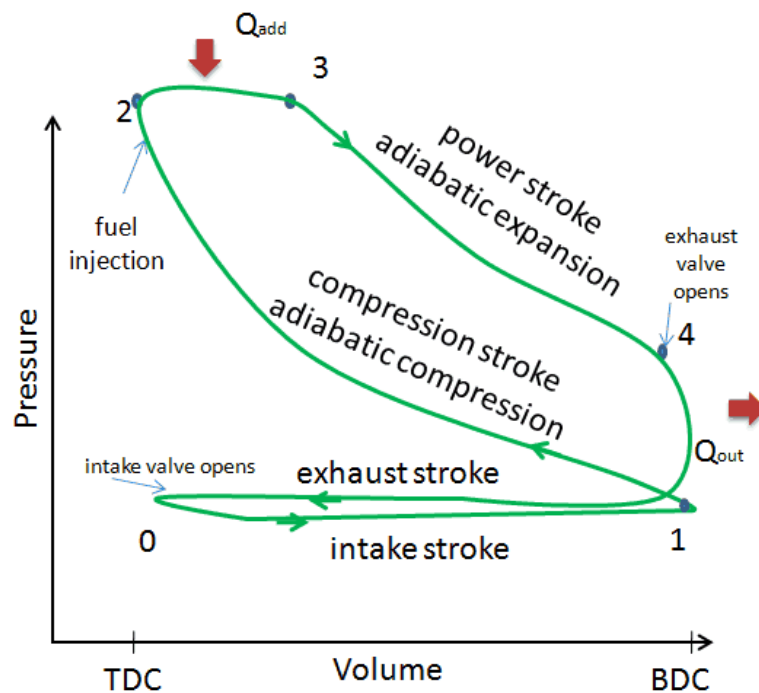


Figure 4 : Cycle d'un moteur Diesel

Pour des raisons de simplicité, le cycle est modélisé (**figure 5**) par une suite de transformations dont nous allons étudier les caractéristiques :

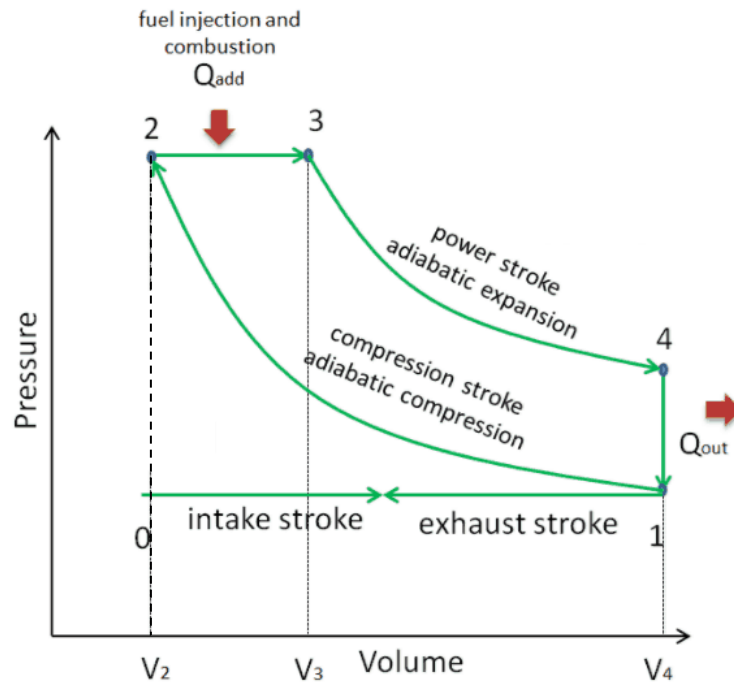


Figure 5 : Cycle Diesel modélisé

- la transformation 1->2 est une compression adiabatique,
- la transformation 2->3 est une transformation isobare,
- la transformation 3->4 est une détente adiabatique,
- la transformation 4->1 est une transformation isochore.

P16. D'après la **figure 5**, citer la grandeur qui reste constante lors d'une transformation isochore (4->1).

P17. Lors d'une transformation adiabatique, l'énergie thermique échangée avec le milieu extérieur est nulle. En déduire sous quelle forme est alors échangée l'énergie lors de cette transformation.

P18. Le transfert thermique effectivement reçu par le gaz correspond à la phase de combustion 2->3. Les porte-conteneurs utilisent du fioul lourd (norme ISO 8217 RMK55) constitué d'un mélange d'hydrocarbures, essentiellement des alcanes comprenant de nombreux atomes de carbone. En faisant l'hypothèse qu'il est constitué du seul alcane $C_{18}H_{38}$, écrire la réaction de combustion du fioul dans le dioxygène de l'air.

Le **pouvoir calorifique inférieur** est le transfert thermique associé à la combustion d'un kilogramme de carburant, et sa valeur est dans le cas du carburant utilisé par le moteur de $42,7 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (voir **annexe 2**).

P19. Le BSFC en $\text{g} \cdot \text{kWh}^{-1}$ (voir **annexe 2**) est la consommation en nombre de gramme de carburant par heure et par kW de puissance mécanique. Retrouver dans le document la puissance en kW pour le mode R1 (vitesse de piston et pression dans le piston maximales) et le BSFC pour le mode R1 et à charge maximale (ligne « load 100% »), puis calculer la consommation en carburant du moteur en $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$. On rappelle que le moteur comporte 14 cylindres.

P20. Calculer la puissance thermique fournie par la réaction de combustion.

Le diagramme (P, V) d'un cylindre du moteur Diesel RTA96C étudié a l'apparence de la **figure 6**. On admet que le travail mécanique fourni au piston en Joule est égal à l'aire intérieure au cycle, si P est en Pascal et V en m^3 . On donne, pour un cylindre, les indications suivantes : $P_{min} = 1 \text{ bar}$, $P_{max} = 160 \text{ bar}$. La variation de volume ΔV correspond à la cylindrée du moteur.

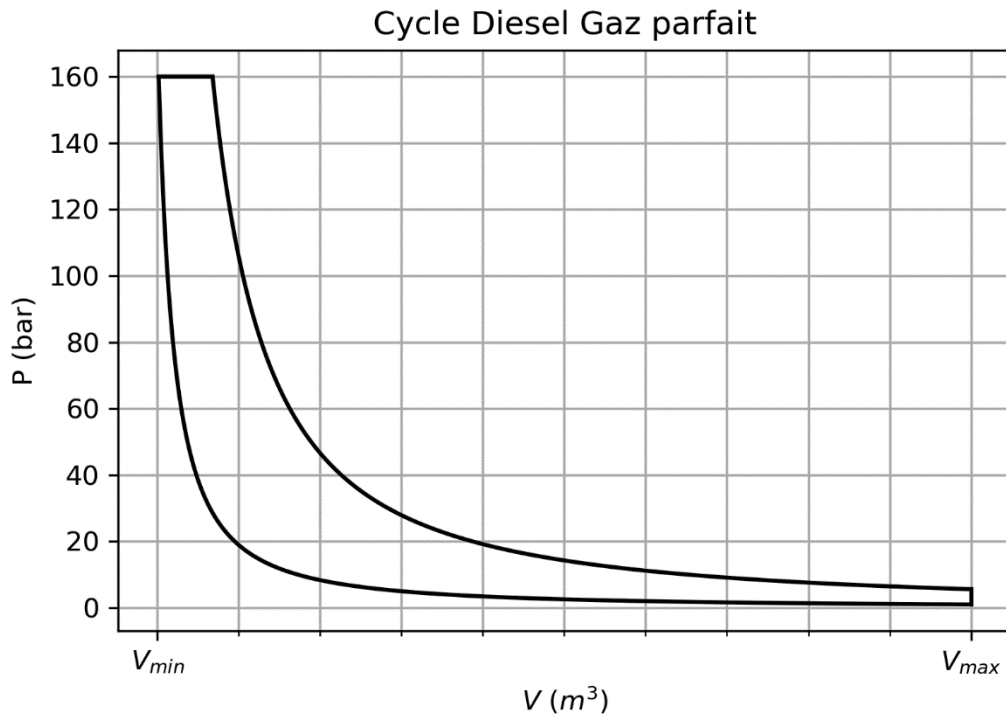
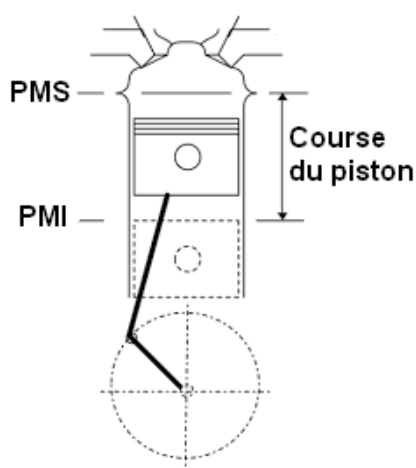


Figure 6 : Diagramme (P, V) du cycle Diesel



Cylindrée d'un moteur

La cylindrée d'un moteur est le volume balayé par la translation du piston lors de sa course (*stroke* en anglais) entre le point le plus bas (Point Mort Inférieur) et le point le plus haut (Point Mort Supérieur).

L'alésage du cylindre est le diamètre intérieur en langage technique (*bore* en anglais).

Figure 7 : Cylindrée d'un moteur

P21. À partir des caractéristiques techniques du cylindre données en **annexe 2**, calculer la cylindrée ΔV et montrer que l'échelle des graduations correspondant à un carreau de l'axe horizontal de la **figure 6** vaut $0,18 \text{ m}^3$.

P22. Déterminer le travail $W = \Delta P \times \Delta V$ correspondant à un carreau de la **figure 6**.

P23. Estimer le nombre de carreaux de l'aire intérieure au cycle de la figure 6 et en déduire le travail total d'un cycle pour un cylindre.

P24. Compte tenu de la vitesse de rotation du moteur en mode R1 que l'on peut trouver dans la documentation (**annexe 2**), qui est égal au nombre de parcours du cycle en une minute, trouver la valeur de la puissance mécanique fournie par un cylindre, puis par l'ensemble des cylindres. Commenter.

P25. Calculer le rendement réel du moteur en utilisant les données du constructeur (**annexe 2**).

2. Amélioration par panneaux solaires

On se propose d'adjoindre un moteur électrique alimenté par panneaux solaires afin de réduire la consommation du porte conteneur. Le moteur électrique a un rendement global de 85%. On suppose que les panneaux solaires utilisés sont de qualité moyenne (rendement de 5%) et on rappelle que le Soleil fournit sur Terre une puissance par unité de surface de l'ordre de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. On considérera que le porte-conteneurs a pour longueur 400 m et pour largeur 60 m.

P26. Construire une réponse étayée par des arguments en ordre de grandeur sur la viabilité d'installer des panneaux solaires pour alimenter le porte conteneur.

3. Diminution de vitesse

P27. Une autre alternative en discussion actuellement est de diminuer la vitesse des porte-conteneurs de 24 nœuds à 18 nœuds, afin de réduire les frottements subis par le navire, et ainsi réduire la consommation. Estimer les économies d'énergie induites par une telle mesure. Commenter.

Annexe 1 : Mouvement du Navire AL JMELIYAH



Annexe 2 : Données constructeur sur le moteur RTA96C

Main data RTA96C

Cylinder bore	960 mm
Piston stroke	2 500 mm
Speed	92 - 102 rpm
Mean effective pressure at R1	18.6 bar
Piston speed	8.5 m/s
Fuel specification:	
Fuel oil	730 cSt/50°C 7 200 sR1/100°F ISO 8217, category ISO-F-RMK 55

Rated power: Propulsion Engines

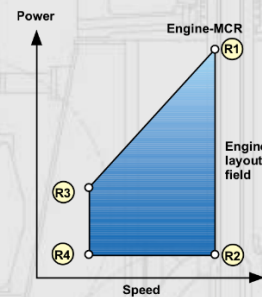
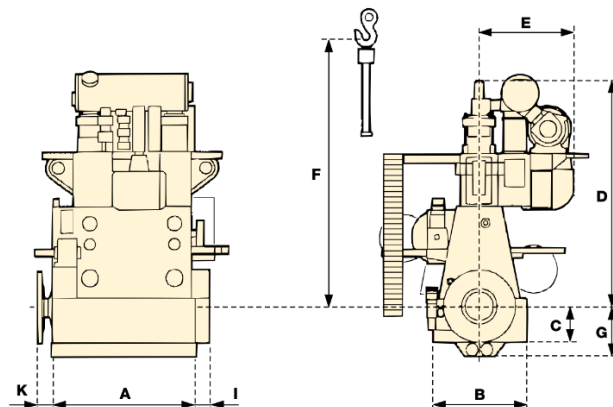
Cyl.	Output in kW/bhp at							
	102 rpm				92 rpm			
	R1		R2		R3		R4	
	kW	bhp	kW	bhp	kW	bhp	kW	bhp
6	34 320	46 680	24 000	32 640	30 960	42 120	24 000	32 640
7	40 040	54 460	28 000	38 080	36 120	49 140	28 000	38 080
8	45 760	62 240	32 000	43 520	41 280	56 160	32 000	43 520
9	51 480	70 020	36 000	48 960	46 440	63 180	36 000	48 960
10	57 200	77 800	40 000	54 400	51 600	70 200	40 000	54 400
11	62 920	85 580	44 000	59 840	56 760	77 220	44 000	59 840
12	68 640	93 360	48 000	65 280	61 920	84 240	48 000	65 280
14	80 080	108 920	56 000	76 160	72 240	98 280	56 000	76 160

Brake specific fuel consumption (BSFC)

	g/kWh	g/bhp	g/kWh	g/bhp	g/kWh	g/bhp	g/kWh	g/bhp
Load 85 %	166	122	160	118	166	122	160	118
Load 100 %	171	126	163	120	171	126	164	121
BMEP, bar	18.6		13.0		18.6		14.4	
	R1		R2		R3		R4	

Principal engine dimensions (mm) and weights (tonnes)

Cyl.	A	B	C	D	E	F	G	I	K	Weight
6	11 564	4 480	1 800	10 925	5 232	12 880	2 594	723	676	1 160
7	13 244	4 480	1 800	10 925	5 232	12 880	2 594	723	676	1 290
8	15 834	4 480	1 800	10 925	5 232	12 880	2 594	723	676	1 470
9	17 514	4 480	1 800	10 925	5 232	12 880	2 594	723	676	1 620
10	19 194	4 480	1 800	10 925	5 232	12 880	2 594	723	676	1 760
11	20 874	4 480	1 800	10 925	5 232	12 880	2 594	723	676	1 910
12	22 541	4 480	1 800	10 925	5 232	12 880	2 594	723	676	2 050
14	25 914	4 480	1 800	10 925	5 232	12 880	2 594	723	676	2 300



Definitions:

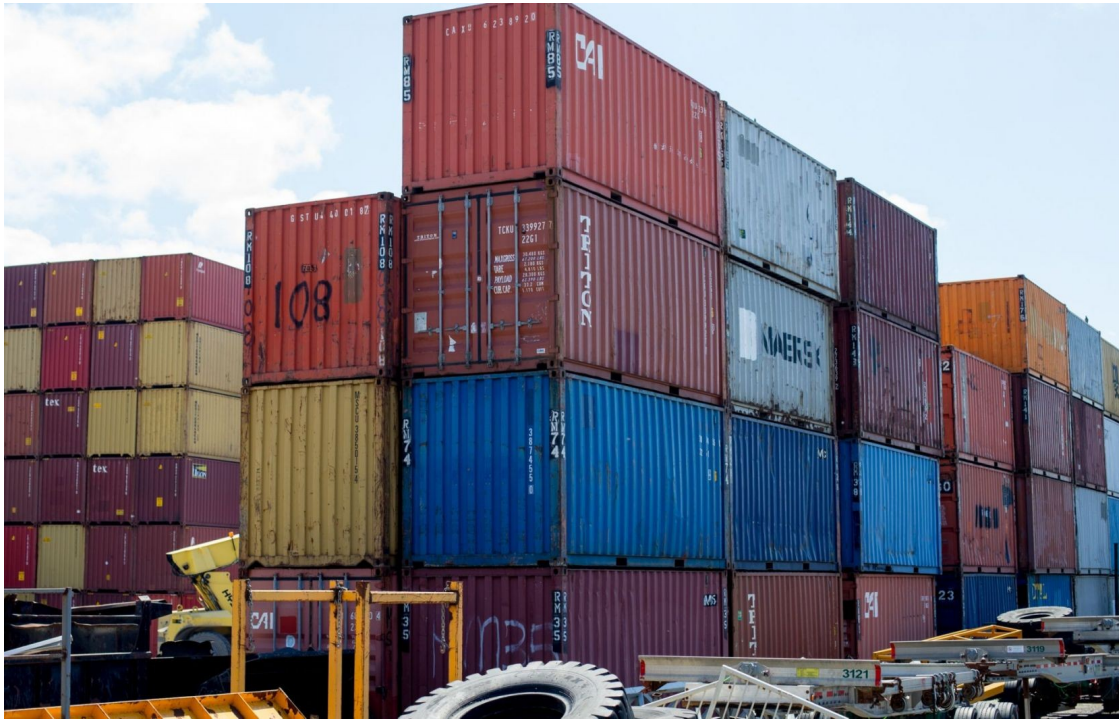
- R1, R2, R3, R4 = power/speed ratings at the four corners of the RTA engine layout field (see diagram).
- R1 = engine Maximum Continuous Rating (MCR).
- Contract-MCR (CMCR) = selected rating point for particular installation. Any CMCR point can be selected within the RTA layout field.
- BSFC = brake specific fuel consumption. All figures are quoted for fuel of net calorific value 42.7 MJ/kg (10 200 kcal/kg) and ISO standard reference conditions (ISO 3046-1). The BSFC figures are given with a tolerance of 5%, without engine-driven pumps.
- The values of power in kilowatts and fuel consumption in g/kWh are the official figures and discrepancies occur between these and the corresponding bhp values owing to the rounding of numbers.
- ISO standard reference conditions
 - Total barometric pressure 1.0 bar
 - Suction air temperature 25 °C
 - Scavenge air cooling-water temperature 25 °C
 - Relative humidity 60%

Données Constructeur sur le moteur RTA96C (Source Wärtsilä). *Cylinder bore* est le diamètre intérieur du cylindre (alésage en langage technique), *Piston stroke* est la course du piston entre sa position la plus haute et sa position la plus basse. R1 correspond au mode de fonctionnement à puissance et vitesse maximale en régime continu.

Chimie

Le conteneur de « base » le plus répandu est une simple boîte, souvent en acier corten soudé « COR-TEN steel » (U.S. Steel trademarked name). CORTEN est un alliage d'acier développé pour mieux résister à la corrosion atmosphérique que les autres aciers. On considère que la durée de vie d'un conteneur est de 15 ans.

Source: <http://containertech.com/about-containers/>



Source (photo) :Annik MH de Carufel Le Devoir

<https://www.ledevoir.com/culture/497464/comment-et-pourquoi-le-conteneur-est-devenu-le-symbole-concentre-de-notre-temps>

- A. La salinité de l'eau de mer
- B. L'acier CORTEN et le phénomène de corrosion
- C. L'atmosphère saline corrosive

ANNEXES

- Document n°1 : Extrait de fiches de données de sécurité (FDS) d'espèces chimiques
- Document n°2 : La corrosion atmosphérique de l'acier
- Document n°3 : Définition de l'acier CORTEN
- Document n°4 : Exemples de caractéristiques d'un acier CORTEN-A ou B
- Document n°5 : Données pour analyse de spectre RMN du proton

Le candidat veillera à lire tous les documents.

En effet, de nombreuses explications et réponses se trouvent dans les annexes.

A. La salinité de l'eau de mer.

Les porte-conteneurs étant amenés à passer de nombreuses années en mer, on étudie en premier la salinité de l'eau de mer.

Définition de la salinité :

La salinité **S** est la masse totale de résidus solides (en gramme) contenue dans 1 kg d'eau de mer.

La salinité peut s'exprimer sans unité, en ‰ ou en psu (practical salinity unit) : $1\text{g/kg} = 1\text{‰} = 1\text{ psu}$

Selon la loi de Dittmar (1884), la salinité varie d'un endroit à l'autre mais les proportions des sels dissous restent les mêmes dans tous les océans. Il suffit donc de connaître une concentration pour les avoir toutes.

Ainsi, la salinité **S** peut être calculée à partir de la chlorinité **Cl** dont la définition est donnée ci-dessous.

La salinité moyenne des océans est de 35 ‰ et reste généralement comprise entre 30 ‰ (Atlantique Nord) et 40 ‰ (Mer Rouge).

C1. A partir des données de la figure 1, montrer que la salinité de l'eau de mer suivante est égale à 35 ‰.

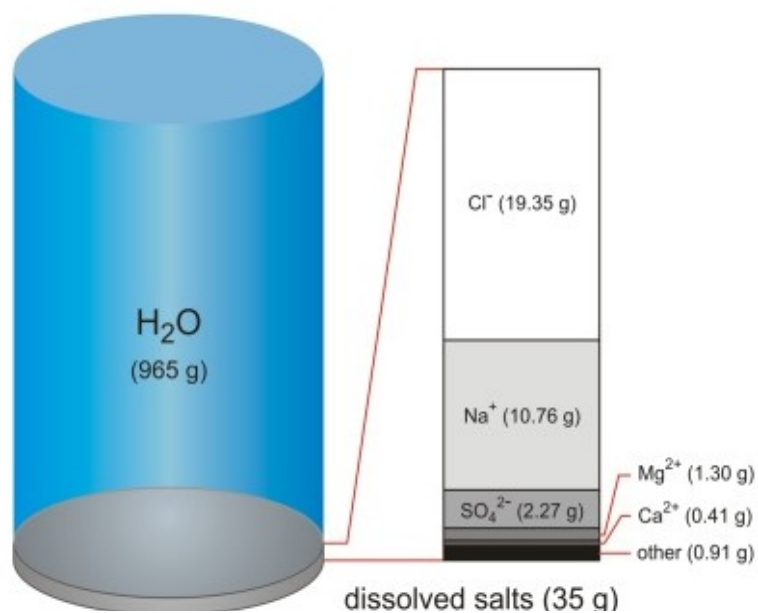


Figure 1 - Composition chimique de l'eau de mer ayant une salinité de 35‰

Source : https://www.periodni.com/chlorinity_and_salinity_of_seawater.html

C2. Pourquoi ne peut-on pas tout simplement chauffer l'eau de mer pour évaporer l'eau et ainsi obtenir directement la salinité ?

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la salinité. On s'intéresse à deux d'entre elles et on cherche à analyser un échantillon d'eau de mer.

Première méthode : détermination de la salinité de l'eau de mer par la méthode de titrage de Mohr-Knudsen

Depuis sa création en 1902, le Conseil international pour l'Exploration de la mer a employé comme méthode standard pour la détermination de la salinité de l'eau de mer : mesure de sa chlorinité par titrage au nitrate d'argent.

On suppose que la chlorinité **Cl** est la masse en gramme des ions chlorure, contenue dans 1 kg d'eau de mer. L'unité de la chlorinité est donc en ‰ ou en g/kg.

Pour s'assurer que tous les résultats obtenus par ce procédé sont indépendants de la date et du lieu de l'analyse, on détermine la chlorinité d'un échantillon quelconque d'eau de mer par comparaison avec une eau de référence, dont la chlorinité a été déterminée sur la base d'une provision « d'une eau de référence primaire ».

La loi de Dittmar (1884), indiquant que les proportions des sels dissous sont les mêmes dans tous les océans, conduit à établir une relation de proportionnalité entre la salinité et la chlorinité.

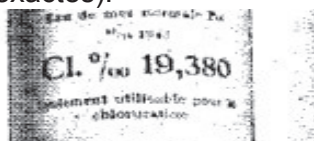
La salinité **S** (‰) correspondant à une chlorinité donnée **Cl** (‰) est fixée depuis 1965 par l'UNESCO :

$$\mathbf{S = 1,80655 Cl}$$

Pour réaliser le titrage, il faut les solutions suivantes :

- **une eau de référence EN**, dite « étalon » : elle est stockée dans une ampoule de verre scellée de volume environ égal à 200 mL, sa chlorinité est très voisine de 19,38‰ (l'indication sur l'étiquette doit avoir trois décimales exactes).

Exemple d'étiquette :



- **une solution de nitrate d'argent Ag** ainsi

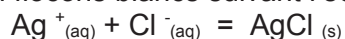
préparée : à chaque litre d'eau distillée, ajouter 37,11 g de nitrate d'argent pur. La solution doit être conservée dans un flacon brun.

- **une solution de chromate de potassium** préparée ainsi : 20g pur dans 250 mL d'eau distillée.

- **un échantillon d'eau de mer à analyser EM** dont on cherche à connaître la chlorinité.

Principe du titrage :

Lorsqu'on ajoute à une solution de chlorure de sodium une solution de nitrate d'argent, du chlorure d'argent est précipité en flocons blancs suivant l'équation de réaction :



Un indicateur de fin de réaction (quelques gouttes d'une solution de chromate de potassium K_2CrO_4) est utilisé : lorsque tous les ions chlorure sont précipités, l'addition d'un excès de nitrate d'argent donne lieu à la formation d'un précipité de chromate d'argent (Ag_2CrO_4), d'une teinte rouge caractéristique. L'apparition de cette teinte rouge indique que le titrage est terminé.

Le principe de l'analyse consiste alors à prélever des volumes égaux **V** (mesurés précisément pour qu'ils soient identiques mais sans qu'il soit nécessaire d'en connaître la valeur) d'un échantillon d'eau de mer **EM** et un échantillon d'eau de référence **EN**, et à déterminer le rapport entre les quantités de nitrate d'argent utilisées pour précipiter la totalité des ions chlorure dans l'un et l'autre de ces échantillons.

Soit Cl_{EM} (respectivement Cl_{EN}) la chlorinité de l'eau de mer (resp. de l'eau de référence).
 Soit V_{EM} (resp. V_{EN}) le volume équivalent de nitrate d'argent lors du titrage de l'eau de mer (resp. lors du titrage de l'eau de référence)
 Soit d_{EM} (resp. d_{EN}) la densité de l'eau de mer (resp. celle de l'eau de référence).

Exemple de résultats expérimentaux :

Date	Température	Numéro de l'échantillon	Lecture (burette mL)	Chlorinité Cl (‰)
14/11	23°C	Eau de référence	19,345	19,380
		EM n°1	18,92	18,96
		EM n°2	18,91	18,95
		EM n°3	19,11	19,15
		EM n°4	19,125	19,165

- C3.** Justifier le choix d'une chlorinité d'environ 19,38‰ pour l'eau de référence.
- C4.** En exploitant les fiches de données de sécurité, indiquer quels pictogrammes doivent être apposés sur l'étiquette du nitrate d'argent mis à disposition pour préparer la solution correspondante.
- C5.** Expliquer pourquoi le chromate de potassium est appelé « indicateur de fin de réaction ».
- C6.** Rappeler l'équation de la réaction de titrage et définir son équivalence.
- C7.** Quelles sont les deux grandeurs supposées constantes dans l'analyse selon Mohr-Knudsen ?
- C8.** Démontrer que la concentration molaire en ions chlorure $[Cl]_{EM}$ d'une eau de mer peut s'exprimer à l'aide de la formule suivante : $[Cl]_{EM} = \frac{Cl_{EM} \times d_{EM}}{M_{Cl}}$ où M_{Cl} est la masse molaire du chlore.
- C9.** En appliquant le résultat précédent à l'eau de référence, montrer alors la relation suivante :

$$Cl_{EM} = Cl_{EN} \times \frac{V_{EM}}{V_{EN}} \times \frac{d_{EN}}{d_{EM}}$$

- C10.** Déterminer la chlorinité moyenne et la salinité de l'eau de mer analysée.

C11. A partir du graphe de la figure 2 ci-dessous, déterminer la densité de l'eau de mer analysée.

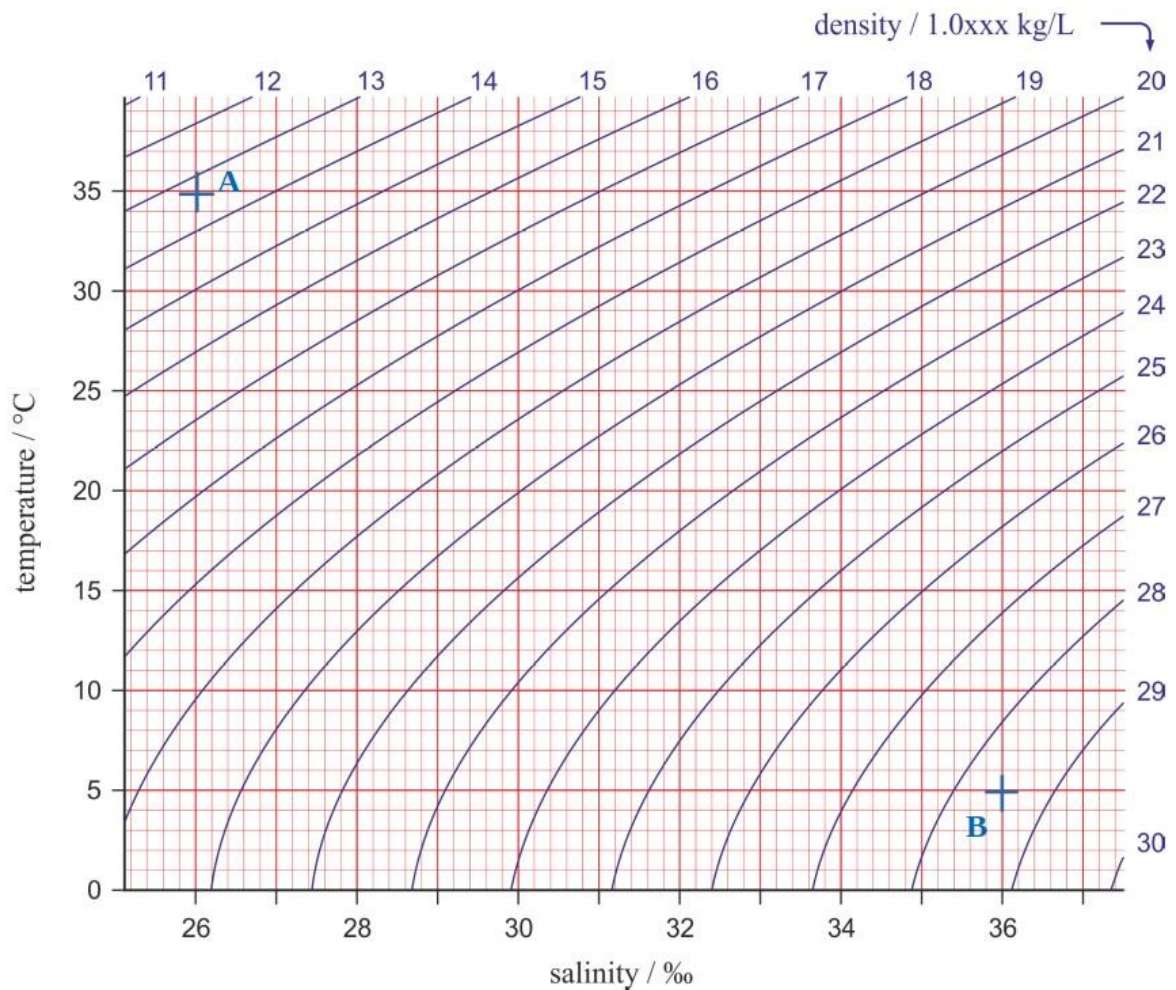


Figure 2 - Graphique montrant la relation entre la température, la salinité et la densité.

Source : https://www.periodni.com/chlorinity_and_salinity_of_seawater.html

Aide pour la lecture de la densité :

Les trois derniers chiffres se lisent sur l'axe horizontal du haut ou l'axe vertical de droite.

Exemples :

- Situation A (température 35°C, salinité 26‰), la densité est comprise entre 1,013 et 1,014, on estime ensuite le troisième chiffre, soit ici, une densité égale à 1,0133.
- Situation B (température 5°C, salinité de 36‰), la densité correspondante est 1,0285.

Deuxième méthode plus récente : Mesure de la conductivité.

Étant donné que les ions conduisent le courant électrique, une variation de salinité engendre une conductivité différente.

Le graphique suivant permet de connaître la salinité à partir de la température et de la conductivité de l'échantillon analysé. On rappelle que la salinité peut s'exprimer en ‰ ou en psu et que 1 psu = 1 ‰.

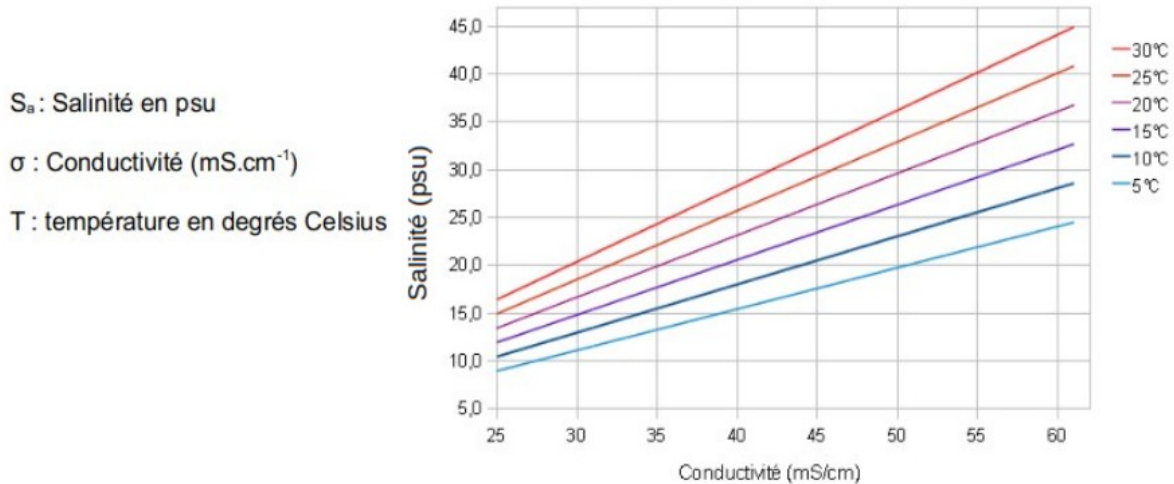


Figure 3 – Salinité en fonction de la conductivité et de la température

Source : http://www.kikiwi.fr/uploads/data/Mesures/Conductimetre/conductimetre_v1.2.pdf

L'équation des droites de la figure 3 est donnée par l'expression suivante :

$$S_a = (0,72 \times \sigma - 3,06) \times (1 + 0,02(T - 25))$$

Lors d'une analyse conductimétrique, il convient d'étalonner d'abord le conductimètre. Le laboratoire possède l'étalon suivant :

Exemple de liquide utilisé pour l'étalonnage	Salinité attendue	Mesure
Etalon AccuraSea (2 Little Fishies) ⁽¹⁾ Fait à partir d'eau de mer naturelle	35 ‰	53,0 mS/cm (25°C)

Source (1) : <https://recifalnews.fr/2016/12/accuratesea-de-two-little-fishies-calibrer-vos-appareils-de-mesure-refractometres/>

C12. Comment varie la conductivité si la température d'un échantillon augmente ? Proposer une explication.

C13. Justifier le choix de l'étalon ayant une salinité égale à 35‰.

C14. On souhaite réaliser un étalon. Déterminer la masse de sel m_{sel} à dissoudre dans 1000g d'eau, sachant que le sel est hygroscopique (il contient 15,0 % d'eau) et qu'on veut obtenir une salinité de 35 ‰.

ATTENTION, comme le sel est hygroscopique, la masse de sel ajoutée est dans ce cas :

m_{sel} = m_{résidu} + m_{eau} ; m_{eau} étant la masse d'eau contenue dans le sel ajouté.

C15. Une eau de mer analysée donne une conductivité de 54,06 mS.cm⁻¹ à la température de 23°C. En déduire la salinité de l'eau de mer analysée.

C16. Un océanographe souhaite étudier la salinité des eaux de mer traversées. Quelle méthode lui conseilleriez-vous ? Argumenter votre réponse.

C17. Quelles autres méthodes d'analyse permettraient de déterminer la chlorinité ou la salinité d'une eau de mer ?

B. L'acier CORTEN et le phénomène de corrosion.

On s'intéresse d'abord à la corrosion de l'acier, de manière générale.

Les premières questions de cette partie exploitent le document 2 portant sur la corrosion atmosphérique de l'acier.

C18. En vous appuyant sur l'équation de la réaction donnée dans le document n°2, vérifier que la définition de la corrosion atmosphérique donnée par la norme ISO 8565 est respectée.

Norme ISO 8565 :
La corrosion atmosphérique [...] correspond à une corrosion aqueuse, pour laquelle l'atmosphère terrestre ambiante constitue l'environnement corrosif.

C19. Citer trois facteurs pouvant influencer la corrosion atmosphérique.

C20. A partir de quel taux d'humidité relative la corrosion de l'acier devient-elle sensible ?

C21. Quelle espèce chimique est responsable de la couleur rouille claire ? Quel cation est présent dans cette espèce chimique ?

C22. La magnétite Fe_3O_4 contient deux types de cations (Fe^{2+} et Fe^{3+}). Sachant que chaque oxygène est porteur de deux charges négatives, trouver le nombre de chaque cation présent dans la magnétite.

C23. En vous aidant de la description nanoscopique de la rouille (figure 3 du document 2), identifier les différentes étapes de la formation de FeOOH à partir du fer Fe métallique. Indiquer sous quelle forme se trouve le fer à chaque étape et identifier les étapes où le fer subit une réaction d'oxydation.

C24. Citer l'oxydant responsable de la corrosion schématisée sur la figure 3 du document 2.

C25. Justifier la phrase du document 2 : « le composé FeOOH peut être considéré comme du Fe_2O_3 hydraté ».

Les alliages à base de fer.

Un alliage est un produit résultant du mélange d'un métal avec d'autre(s) élément(s) métallique(s) ou non.

L'intérêt de combiner des éléments est d'obtenir des propriétés que l'on n'a pas avec un métal « pur ».

Il existe plusieurs grandes familles d'alliages et on s'intéresse uniquement à celle à base de fer.

Parmi les alliages de fer les plus connus, on trouve :

- l'acier : le fer est allié à une quantité de carbone inférieure à 2 %
- l'acier inoxydable (inox) : l'acier contient également du chrome pour résister à la corrosion
- la fonte : c'est un alliage de fer et de carbone (2 à 6,67%)

Les conteneurs pouvant être en acier CORTEN, on s'intéresse à cet acier CORTEN, commercialisé par une entreprise dont les caractéristiques sont données dans le document n°4.

C26. Rappeler le métal de base présent dans l'acier puis calculer son pourcentage minimal dans l'acier CORTEN A cité dans le document n°4.

C27. D'après le document 3, quels sont les métaux qui rendent l'acier CORTEN intéressant face au phénomène de corrosion ?

Afin de déterminer l'influence du nickel, l'expérience suivante a été réalisée sur quatre types d'acier : l'acier (Carbon steel Q235) et trois aciers faiblement alliés 0,8Ni, 2Ni et 5Ni. Le nombre placé avant le symbole Ni indique le pourcentage en masse (weight percent en anglais) de nickel présent dans l'alliage. Ainsi, 0,8Ni est un alliage avec 0,8 % en masse de nickel.

Une simulation d'atmosphère corrosive est créée en utilisant l'électrolyte suivant : une solution corrosive contenant « 1,0 % en masse de NaCl et 0,01 mol.L⁻¹ NaHSO₃ ».

Chaque acier est découpé pour obtenir quatre échantillons de dimension :

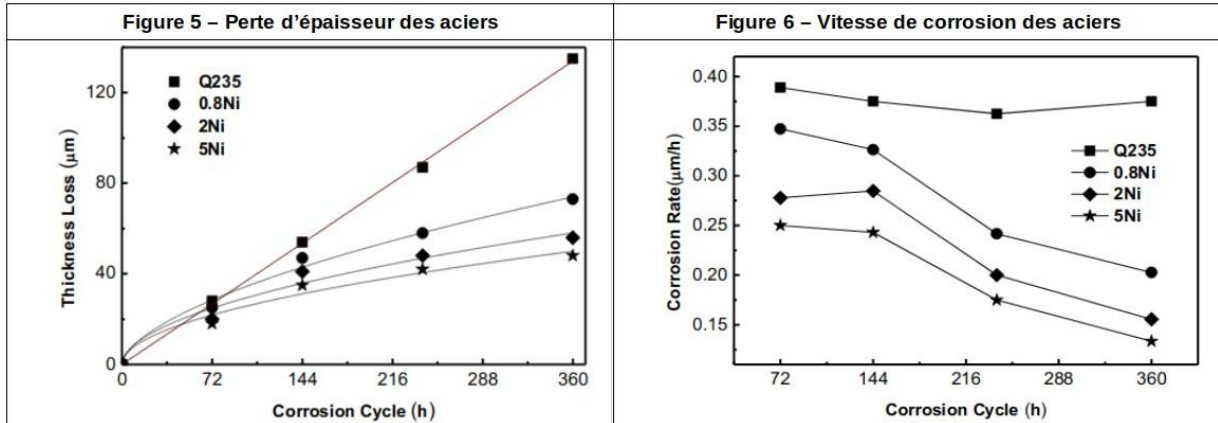
3 mm * 25 mm * 30 mm.

Les échantillons testés sont plongés 12 minutes dans l'électrolyte puis séchés 48 minutes dans une atmosphère (température de 45±2°C, humidité relative comprise entre 60 et 80 %). Chaque cycle dure donc 60 minutes. Les échantillons subissent respectivement 72, 144, 240 et 360 cycles (heures).

A l'issue du cycle, les échantillons sont immergés dans un liquide détartrant. Alors que l'acide chlorhydrique est un excellent détartrant, on ajoute souvent un composé hétérocyclique contenant de l'azote. On utilise donc ici le mélange suivant : « 50 mL d'acide chlorhydrique concentré + 50 mL d'eau distillée + 0,35 g d'hexaméthylènetétramine » pendant 10 minutes.

Les échantillons sont ensuite rincés avec de l'eau désionisée, puis séchés avec un souffleur d'air chaud, et enfin pesés.

Les deux graphiques suivants présentent les résultats de l'expérience :



Source : <http://www.electrochemsci.org/papers/vol11/110504161.pdf>

C28. Commenter la perte de masse pour l'acier Q235.

C29. Comment varie le phénomène de corrosion avec la présence de Nickel ?

La littérature rapporte que la couche protectrice de rouille (**rust layer**) est en réalité une stratification en deux sous-couches à la surface de l'acier : une couche interne (**inner**) compacte et adhérente et une couche externe (**outer**) moins adhérente et poreuse. La figure suivante montre la macromorphologie de la couche de rouille sur les quatre aciers, après 360h :

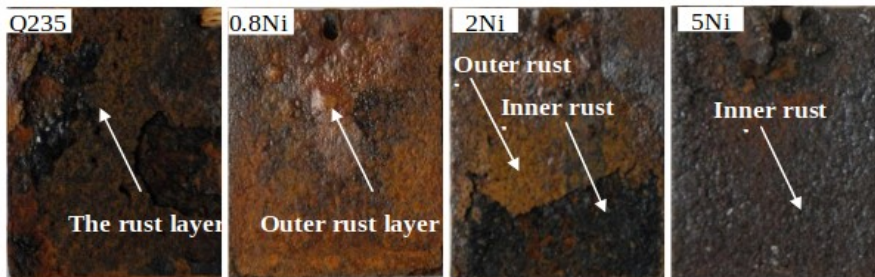


Figure 7 – Macromorphologie de la couche de rouille sur les quatre aciers, après 360h

Source : <http://www.electrochemsci.org/papers/vol11/110504161.pdf>

C30. Laquelle des deux couches protège l'acier de la corrosion ?

C31. Le tableau suivant permet de connaître la distribution des éléments dans les couches interne et externe de la rouille. La dernière colonne indique le pourcentage en masse du nickel après 360h de corrosion. Proposer une interprétation afin de quantifier la présence de nickel dans les couches de rouille interne et externe.

Steel	Rust layer	Ni
0.8Ni	Outer	0.73
	Inner	1.18
2Ni	Outer	1.49
	Inner	2.65
5Ni	Outer	3.53
	Inner	3.92

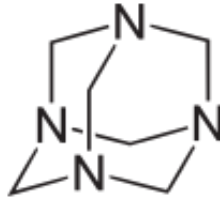
Figure 8 – distribution du nickel dans la couche de rouille (pourcentage en masse)

Source : <http://www.electrochemsci.org/papers/vol11/110504161.pdf>

C32. En utilisant l'ensemble des résultats expérimentaux, conclure en précisant quel acier allié vous conseillerez d'utiliser pour les conteneurs.

C33. On s'intéresse maintenant à l'électrolyte représentant l'atmosphère corrosive. Calculer la concentration molaire en ions chlorure. Les masses molaires nécessaires sont indiquées dans le document 1.

L'hexaméthylènetétramine, également appelé méthénamine, a la structure suivante :



C34. Nommer le groupe fonctionnel présent et donner la formule brute de la méthénamine.

C35. Quels équipements de protection individuelle (EPI) faut-il porter pour utiliser ce produit ?

C36. Justifier que la méthénamine donne un seul signal en RMN du proton. La multiplicité du signal sera justifié. Pourquoi le déplacement chimique est-il plus élevé que la valeur attendue ? **Un tableau de valeurs de déplacements chimiques est donné en annexe.**

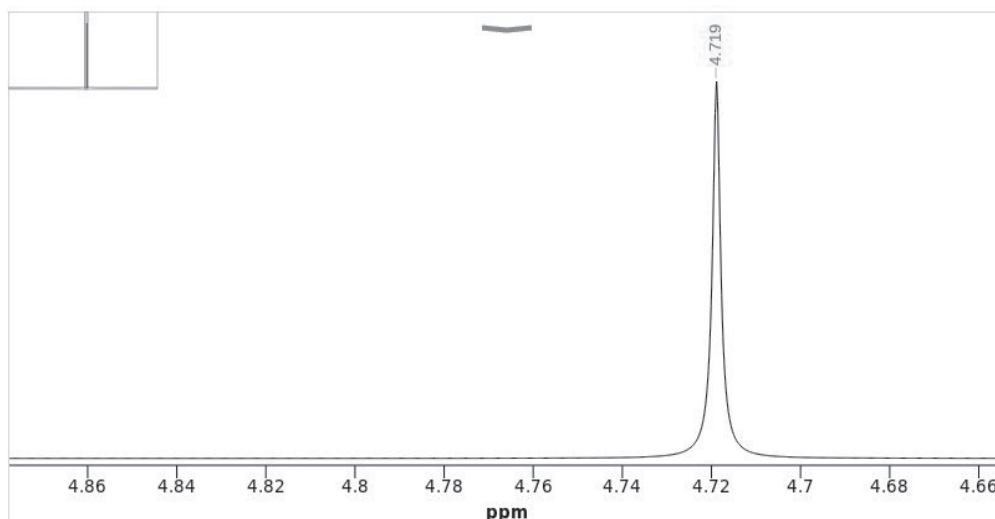


Figure 9 – spectre RMN du proton du méthénamine
Source : https://www.drugbank.ca/spectra/nmr_one_d/2065

C37. La méthénamine se présente sous forme de cristaux incolores hygroscopiques, avec une odeur ammoniacale. Elle est très soluble dans l'eau et les solutions aqueuses de méthénamine sont faiblement basiques. En milieu acide, l'hydrolyse de la méthénamine libère l'acide conjugué de l'ammoniac NH_3 et du méthanal CH_2O . Écrire l'équation de la réaction d'hydrolyse de la méthénamine en milieu acide.

Le phénomène de corrosion étant amplifié en mer, on étudie maintenant les conséquences de l'atmosphère saline sur la corrosion des aciers.

C. L'atmosphère saline corrosive.

Un aérosol désigne une suspension de fines particules (solides ou liquides et différentes de gouttelettes d'eau) dans un milieu gazeux (l'air).

La salinité atmosphérique est la masse d'aérosol marin présente dans un volume unité d'atmosphère. L'unité est le $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

L'effet de la salinité atmosphérique est caractérisé par le taux de déposition à la surface du métal exprimé en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$: il correspond à une masse exprimée en mg déposée par unité de surface et par jour. Sur certaines figures du sujet, cette unité est aussi notée $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{day}$.

Il existe une classification ISO selon la pollution due à l'atmosphère saline, représentée par le taux de déposition des ions chlorure :

Catégorie	Taux de déposition des ions chlorure ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$)	Environnement
S ₀	Salinité atmosphérique $S_{\text{atm}} \leq 3$	Environnement non côtier
S ₁	$3 < S_{\text{atm}} \leq 60$	Environnement côtier
S ₂	$60 < S_{\text{atm}} \leq 300$	
S ₃	$300 < S_{\text{atm}} \leq 1500$	Environnement marin (> 200 m de la côte)

Source : http://zclp.galvinfo.com:8080/zclp/definition/airborne_salinity.html

Une étude, faite sur 41 ponts, et pendant une durée de 9 ans a permis de montrer l'influence de l'atmosphère saline sur la corrosion de l'acier CORTEN : ce graphe met en évidence deux zones selon que la rouille formée est adhérente ou non.

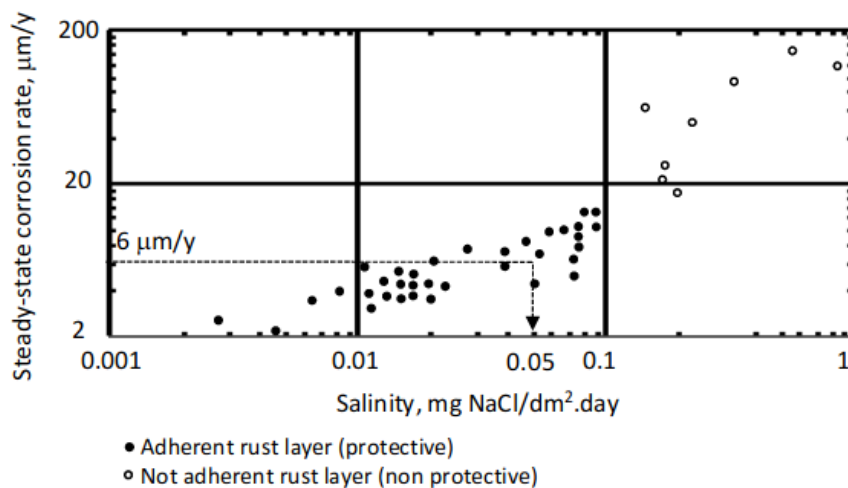


Figure 10 – Influence de la salinité atmosphérique sur la corrosion de l'acier CORTEN

Source : http://digital.csic.es/bitstream/10261/84741/1/weathering%20steels_1.pdf

C38. On sait que les conteneurs en acier CORTEN peuvent ne pas être peints si on ne dépasse pas une vitesse de corrosion (steady-state corrosion rate) de $6 \mu\text{m}/\text{an}$. En déduire alors quelle atmosphère saline (en $\text{mg NaCl}/\text{dm}^2/\text{jour}$) on ne doit-on pas dépasser.

C39. Montrer qu'un taux de déposition d'atmosphère saline de $0,05 \text{ mg de NaCl}/\text{dm}^2/\text{day}$ est équivalent à un taux de déposition d'atmosphère saline de $3 \text{ mg Cl}/\text{m}^2/\text{day}$.

La figure 11 montre l'influence de deux aérosols.

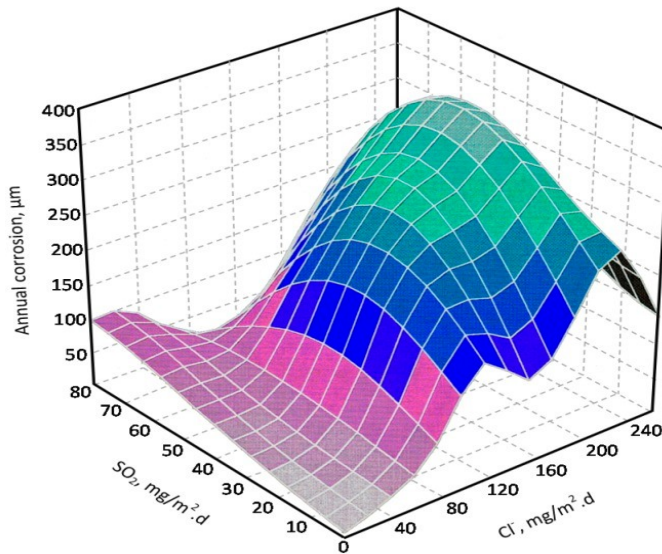


Figure 11 – Représentation 3D de la vitesse de corrosion des aciers en fonction de deux aérosols présents dans l'atmosphère

Source :

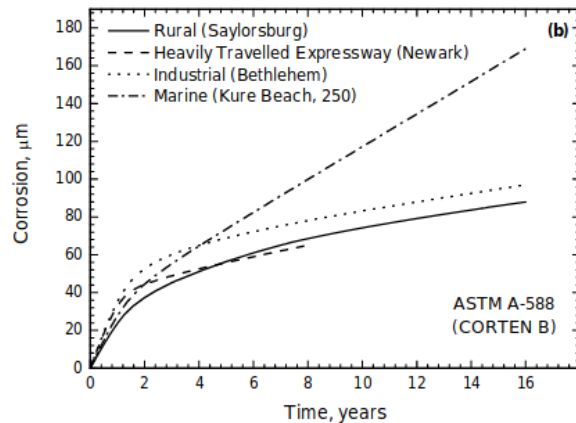
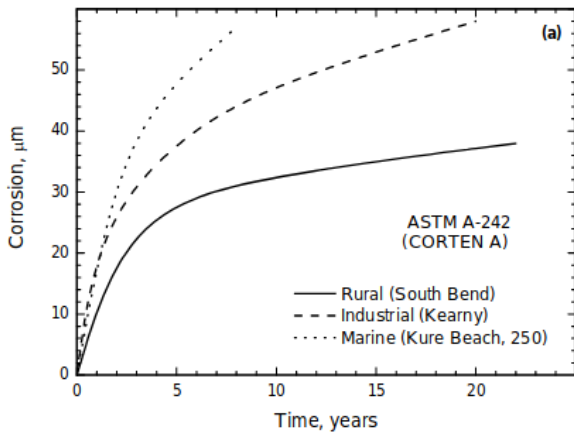
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5506973/>

C40. Lequel des deux aérosols a le plus d'influence sur la corrosion ? Justifier la réponse.

C41. Tracer la courbe montrant l'influence des ions chlorure sur la corrosion en absence de SO_2 . Que constate-t-on ?

On rappelle que l'acier CORTEN existe sous deux formes : le A et le B.

Un fabricant d'acier CORTEN a également à sa disposition les informations suivantes :



Figures 12 A (CORTEN A) et 12B (CORTEN B) : influence du type d'atmosphère sur la corrosion d'un acier CORTEN

Source : http://digital.csic.es/bitstream/10261/84741/1/weathering%20steels_1.pdf (p.35)

C42. En prenant en compte l'ensemble des caractéristiques des aciers CORTEN A et B étudiés, quel acier CORTEN choisiriez-vous pour les conteneurs ?

DOCUMENTS ANNEXES

DOCUMENT n°1: LES FICHES DE DONNÉES DE SÉCURITÉ (FDS) DE QUELQUES PRODUITS

Masse molaire du sodium : 22,99 g·mol⁻¹

Masse molaire du chlore : 35,45 g·mol⁻¹

Extrait de la FDS du chlorure de sodium (CAS number : 7647-14-5)

3.1 Substances

Formule	:	CINa
Poids moléculaire	:	58,44 g/mol
No.-CAS	:	7647-14-5

Source : Sigma-Aldrich – version 6.1 du 31.01.19

Extrait de la FDS de la méthénamine (CAS number : 100-97-0) :

2.1 Classification de la substance ou du mélange

Classification en accord avec la réglementation (EC) No 1272/2008

Matières solides inflammables (Catégorie 2), H228

Sensibilisation cutanée (Catégorie 1), H317

Pour le texte complet des Phrases-H mentionnées dans ce chapitre, voir section 16.

2.2 Éléments d'étiquetage

Étiquetage en accord avec la réglementation (EC) No 1272/2008

Pictogramme



Mention d'avertissement Attention

Mention de danger

H228

Matière solide inflammable.

H317

Peut provoquer une allergie cutanée.

Source : Sigma-Aldrich - version 5.6 du 08.06.2018

Extrait de la FDS du nitrate d'argent solide (CAS number :7761-88-8)

Formule	:	AgNO ₃
Poids moléculaire	:	169,87 g/mol
No.-CAS	:	7761-88-8

Mention de danger

H272

Peut aggraver un incendie; comburant.

H314

Provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves.

H410

Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme.

Source : Sigma-Aldrich – version 5.1 du 17.10.2013

DOCUMENT n°2 : LA CORROSION ATMOSPHÉRIQUE DE L'ACIER

La plupart des métaux et alliages, notamment l'acier, ne sont pas stables au contact de l'air. Les différents constituants (O₂, humidité, aérosols) entraînent le phénomène de corrosion.

On parle de corrosion atmosphérique lorsqu'un film liquide se forme et disparaît de manière cyclique à la surface de l'objet métallique.

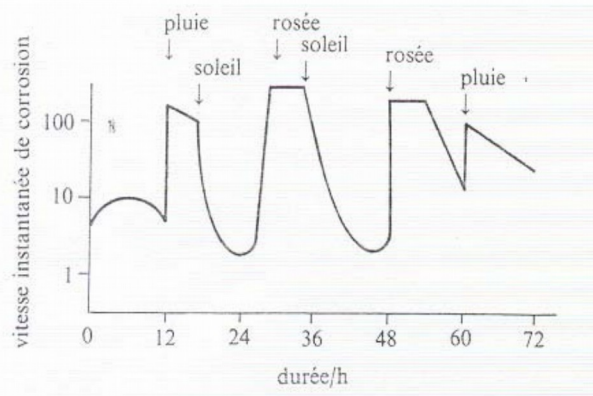


Figure 1 : Variation de la vitesse instantanée de corrosion du fer en fonction des conditions climatiques.
SOURCE: thèse p.34 : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00369510/document>

La vitesse de corrosion dépend de l'humidité relative de l'atmosphère à laquelle est exposé l'acier :

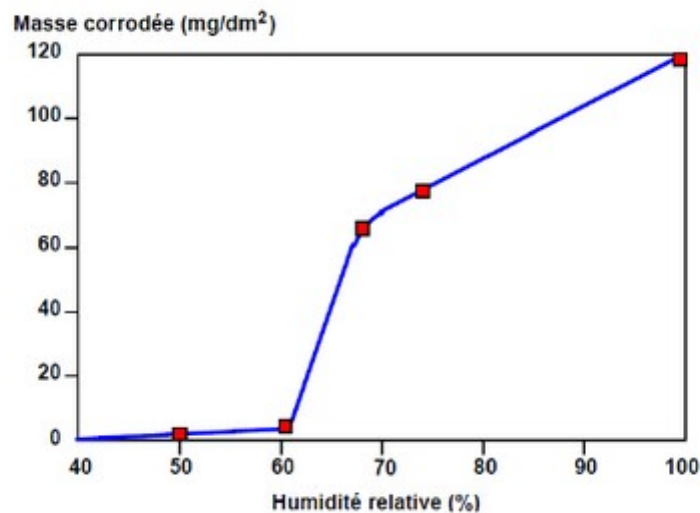
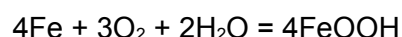


Figure 2 : Masse d'acier corrodée par unité de surface en fonction de l'humidité relative pour des essais de 55 jours
source : https://www.researchgate.net/publication/329415371_Corrosion_des_métaux

Les mécanismes de la corrosion atmosphérique du fer peuvent être décrits par l'équation de réaction :



Le composé FeOOH peut être considéré comme Fe₂O₃ hydraté.

La rouille est en fait un mélange complexe de différentes phases cristallines et amorphes d'oxydes et d'hydroxydes de fer et donc la stœchiométrie ne correspond qu'approximativement à la formule globale FeOOH.

La composition de la rouille varie en fonction des conditions atmosphériques et de la durée d'exposition.

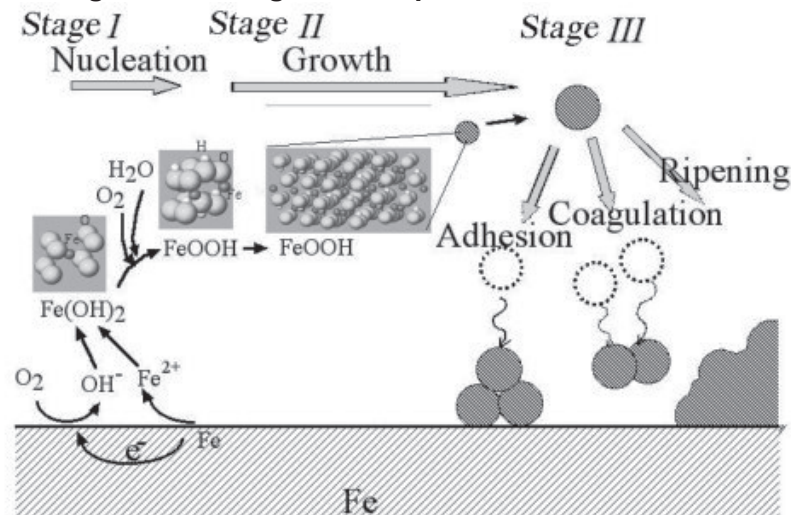
Lorsque l'on expose une surface d'acier humide à l'atmosphère, elle se recouvre rapidement d'un film mince de produits de corrosion. Cette réaction de formation de la rouille est d'autant plus rapide que la surface est contaminée par des aérosols.

On identifie plusieurs types de rouille, par exemple :

La rouille de couleur claire dont la formule est $\text{Fe}(\text{OH})_3$

La rouille de couleur foncée dont la formule est Fe_3O_4

Figure 3 - Schematic diagram showing nanoscopic reaction of rust formation :



source: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9117.pdf>

La première étape « de nucléation » consiste à dissoudre les ions métalliques dans un environnement humide avant de former $\text{Fe}(\text{OH})_2$ insolubles dans la solution. Le séchage conduit à la formation de la rouille FeOOH .

L'étape suivante est le processus de croissance au cours duquel les spores de rouille donnent de fines particules (de l'ordre du nm).

Puis les fines particules subissent des changements pour adhérer et coaguler. Les cycles répétés d'humidité/séchage conduisent à la formation de couches de particules de rouille de plusieurs centaines de nm (jusque 100 micromètres).

DOCUMENT n°3 : DÉFINITION DE L'ACIER CORTEN

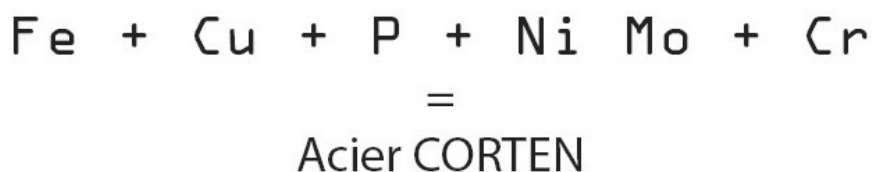
L'acier CORTEN tient son nom de ses principales caractéristiques :

- Résistance à la CORrosion
- TENSile strength = haute résistance mécanique.

Définition selon l'AFNOR (EN 10025:5:2005)

Acier auquel un certain nombre d'éléments, tels que P, Cu, Cr, Ni Mo, ont été ajoutés afin d'en accroître la résistance à la corrosion atmosphérique par la formation d'une couche auto-protectrice d'oxyde sur le métal de base sous l'influence des conditions atmosphériques.

Source : <https://www.so-garden.com/smartblog/24/presentation-acier-corten.html>



La couche auto-protectrice qui se forme est appelée « patine » ou « auto-patine ». Elle passe d'une teinte rouille claire à une teinte proche du marron foncé en environ 2 ans (pour un conteneur).

Selon l'acier CORTEN utilisé, il faut la préserver ou la recouvrir.

L'enrichissement en cuivre et chrome de l'acier Corten permet cette formation d'une couche d'oxydation en surface. À la différence de la rouille qui se détache de la surface du métal après un certain laps de temps, la couche d'oxydation des aciers auto-patinables est beaucoup moins poreuse et adhère mieux à la surface du métal.

Il est nécessaire d'alterner des périodes d'humidité de périodes sèches assez longues pour que la couche se déshydrate partiellement devenant ainsi adhérente, tenace et peu perméable formant une couche protectrice : la patine.

Une dizaine d'années peut s'écouler avant que cette couche couvrante ne soit entièrement formée.

Source : <https://acm-container.fr/acier-corten-container-maritime/>

Source Co-GARDEN : <https://www.so-garden.com/smartblog/24/presentation-acier-corten.html>

DOCUMENT n°4 : EXEMPLES DE CARACTÉRISTIQUES D'ACIERS CORTEN

Il existe deux types d'acier CORTEN : le CORTEN-A et le CORTEN-B :

	CORTEN-A	CORTEN-B	Acier au carbone
Perte de matériau après 10 ans	30-75 µm	75-100 µm	150-200 µm

Le CORTEN-A est un acier résistant aux intempéries, il est réalisé par ajout de cuivre, de chrome et de nickel. Il est particulièrement esthétique et donc adapté aux applications architecturales ou de conduites de gaz. Il n'est pas recommandé pour des applications de charge lourde.

Le CORTEN-B est mieux adapté aux structures possédant des capacités de charges lourdes. La finition naturelle ne requiert normalement aucune forme d'entretien comme la peinture. Cependant un revêtement est nécessaire si la structure est en permanence exposée à l'humidité ou est à proximité de la mer.

CORTEN-A (EN 10025-5:2004)

Composition chimique (en %)										
Classe	C	Si	Mn	P	S	Al	V	Cu	Cr	Ni
CORTEN A	0,12	0,25/0,75	0,20-0,50	0,07/0,15	0,030	0,015/0,06	-	0,25/0,55	0,50/1,25	0,65

CORTEN-B (EN 10025-5:2004)

Composition chimique (en%)										
Classe	C	Si	Mn	P	S	Al	V	Cu	Cr	Ni
CORTEN B	0,19	0,30/0,65	0,80-1,25	0,035	0,030	0,02/0,06	0,02/0,1	0,25/0,40	0,40/0,65	0,40

SOURCE des tableaux:

<https://schaller-creation.ch/wp-content/uploads/2016/04/ThyssenKrupp-Christon-Corten.pdf>

DOCUMENT n°5 : Spectroscopie RMN du proton

Domaines de déplacements chimiques des protons des groupes M

(méthyle CH₃, méthylène CH₂ et méthyne CH)

en α ou en β de groupes caractéristiques.

type de proton	δ en ppm	type de proton	δ en ppm
M-CH ₂ R	0,8-1,6	M-C-CH ₂ R	0,9-1,6
M-C=C	1,6-2,0	M-C-C=C	1,0-1,8
M-C \equiv C	1,7-2,8	M-C-C \equiv C	1,2-1,8
M-Ph	2,2-2,8	M-C-Ph	1,1-1,8
M-F	4,2-4,8	M-C-F	1,5-2,2
M-Cl	3,0-4,0	M-C-Cl	1,5-2,0
M-Br	3,4-4,1	M-C-Br	1,8-1,9
M-I	3,1-4,2	M-C-I	1,7-2,1
M-OH et M-OR	3,2-3,6	M-C-OH et M-C-OR	1,2-1,8
M-OPh	3,8-4,6	M-C-OPh	1,3-2,0
M-O-CO-R	3,6-5,0	M-C-O-CO-R	1,3-1,8
M-O-CO-Ph	3,8-5,0	M-C-O-CO-Ph	1,6-2,0
M-CHO et M-CO-R	2,1-2,6	M-C-CHO	1,1-1,7
M-CO-Ph	3,8-5,0	M-C-COR	1,1-1,8
M-CO-OH et M-CO-OR	1,8-2,6	M-C-CO-Ph	1,1-1,9
M-CO-NR ₂	1,8-2,2	M-C-CO-OR	1,1-1,9
M-C \equiv N	2,2-3,0	M-C-CO-NR ₂	1,1-1,8
M-NH ₂ et M-NR ₂	2,2-3,0	M-C-C \equiv N	1,2-2,0
M-N ⁺ R ₃	3,0-3,6	M-C-N ⁺ R ₃	1,4-2,0
M-NH-CO-R	3,0-3,8	M-C-NH-CO-R	1,1-1,9
M-NO ₂	4,1-4,4	M-C-NO ₂	1,6-2,5
M-SH et M-SR	2,1-5,1	M-C-SH et M-C-SR	1,3-1,9

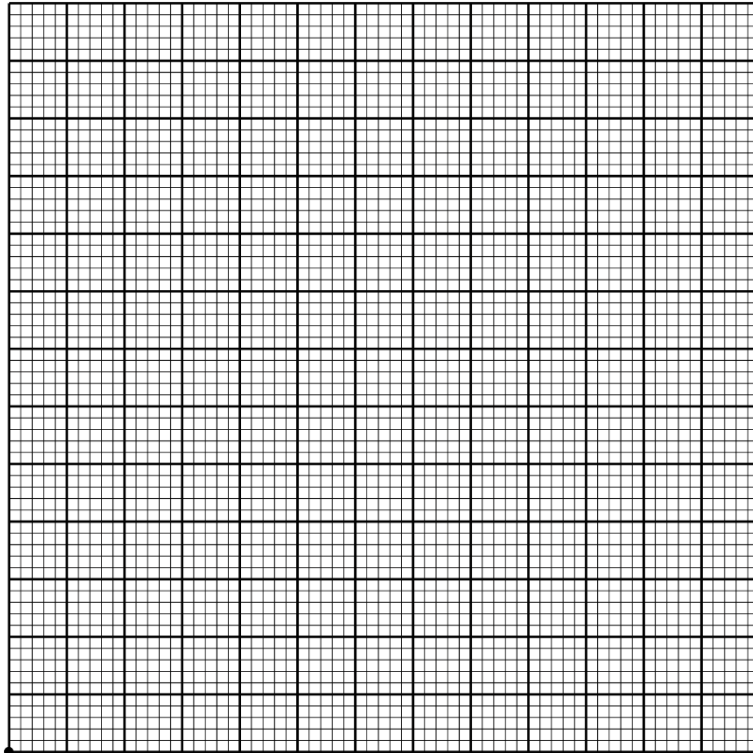
Domaines de déplacements chimiques de divers protons

type de proton	δ en ppm	type de proton	δ en ppm
>C(cycle)=CH ₂	4,6	-CO-OH	8,5-13
>C=CH ₂	5,3	>C=C-OH	11-17
-C=CH-	5,1	Ph-H	7,2
-C=CH-(cyclique)	5,3	R-OH	0,5-5,5
R-C \equiv C-H	3,1	Ar-OH	4,0-7,5
Ar-H	7,0-9,0	Ar-OH (avec liaison H intramoléculaire)	5,5-12,5
>C=CH-CO-	5,9	R-NH-	0,5-3,0
-CH=C-CO-	6,8	Ar-NH-	3,0-5,0
R-CHO	9,9	R-CO-NH-	5,0-8,5
Ar-CHO	9,9	CHCl ₃	7,2
H-CO-O-	8,0	H ₂ O	≈ 5,0
H-CO-N<	8,0		

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Échelle 1 grand carreau = 0,5m

Émetteur 2



Émetteur 1

