

## Eco-isolation thermique d'un réservoir horizontal de supercarburant sans plomb enterré en zones chaudes: Cas de la ville de Korhogo en Côte d'Ivoire

### [ Thermal eco-insulation of a horizontal unleaded premium fuel tank buried in hot areas: Case of the city of Korhogo in Côte d'Ivoire ]

*Emmanuel Bagui<sup>1</sup>, Paul Magloire Ekoun Koffi<sup>1</sup>, Blaise Kamenan Koua<sup>2</sup>, and Prosper Gbaha<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Laboratoire des Procédés Industriels, de Synthèse, de l'Environnement et des Energies Nouvelles (LAPISEN), UMRI 18, Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INPHB), B.P. 581, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>Laboratoire des Sciences de la Matière, de l'Environnement Et de L'Energie Solaire, UFR SSMT, Université Félix Houphouët Boigny, 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2022 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** This prospective study aimed to mitigate the emission of hydrocarbon gases and economic or energy losses. It consisted in designing a storage system for this volatile fluid, based on local materials, capable of ensuring thermal comfort, under natural conditions of terrestrial heating. In view of their respective theoretical availability, accessibility and thermal conductivity, cotton, sand and shea cake have been identified as potential insulators. For this purpose, identical samples of the fuel were buried, each with a specific material. They were respectively subjected to a fraction of solar energy, transmitted according to the thermal properties of the material crossed. The monitoring of the evolution of the different evaporation rates per sample made it possible to classify the insulation tested in order of performance in non-evaporation rate: 1st) shea cake with 90.81%; 2nd) cotton, 89.29%; 3rd) sand, 85.05% and 4th) air, 80.68%. In the light of a multi-criteria analysis by Thomas Saaty, based on more restrictive ecological and economic constraints, shea cake and sand were preferentially chosen. They made it possible to build a fuel storage matrix, called "Eco1-stoc", which recorded an experimental non-evaporation rate of 91.53%. Therefore, the Eco1-stoc can be one of the solutions to be advised in operating conditions similar to those of Korhogo.

**KEYWORDS:** Evaporation, premium unleaded fuel, buried horizontal tank, thermal eco-insulation.

**RESUME:** Cette étude prospective a eu pour objectif d'atténuer l'émission des gaz d'hydrocarbures et les pertes économiques ou énergétiques. Elle a consisté à concevoir un système de stockage de ce fluide volatil, à base des matériaux locaux, à même d'assurer un confort thermique, dans les conditions naturelles d'échauffement terrestre. Au regard de leurs disponibilité, accessibilité et conductibilité thermique théoriques respectives, le coton, le sable et le tourteau de karité ont été identifiés comme potentiels isolants. A cet effet, des échantillons identiques du carburant ont été enterrés, chacun avec un matériau spécifique. Ils ont été respectivement soumis à une fraction d'énergie solaire, transmise en fonction des propriétés thermiques du matériau traversé. Le suivi de l'évolution des différents taux d'évaporation par échantillon, a permis de classer les isolants testés par ordre de performance en taux non-évaporation: 1<sup>er</sup>) le tourteau de karité avec 90,81 %; 2<sup>ième</sup>) le coton, 89,29 %; 3<sup>ième</sup>) le sable, 85,05 % et 4<sup>ième</sup>) l'air, 80,68 %. A la lumière d'une analyse multicritères de Thomas Saaty, dans la base des contraintes écologiques et économiques plus restrictives, le tourteau de karité et le sable ont été préférentiellement choisis. Ils ont permis de construire une matrice de stockage de carburant, dénommée « Eco1-stoc », qui a enregistré un taux expérimental de non-évaporation de 91,53 %. Donc, l'Eco1-stoc peut être une des solutions à conseiller dans les conditions d'exploitation assimilables à celle de Korhogo.

**MOTS-CLEFS:** Évaporation, supercarburant sans plomb, réservoir horizontal enterré, éco-isolation thermique.

## **1 INTRODUCTION**

Le stockage des énergies et la protection de l'environnement naturel et humain sont de plus en plus des sujets d'actualité, eu égard à la complexité du phénomène du réchauffement climatique [1]. L'évaporation du supercarburant sans plomb (SPb) au stockage urbain est aussi devenue un des problèmes majeurs de distribution de produits pétroliers [2]. Elle revêt des préoccupants enjeux économiques et environnementaux [3]. Dans l'optique d'une optimisation de la protection environnementale, les règlements et normes, en matière d'émissions polluantes, sont en perpétuelle adéquation avec le développement des dispositifs de stockage [4]. Cependant, l'efficacité de ces prescriptions relatives aux installations classées a été régulièrement contrariée par l'occurrence assez fréquente des risques et dangers consécutifs à l'évaporation. Ces pertes, quoique toujours perçues mineures par rapport aux grands déversements accidentels, leurs dimensions environnementales et économiques peuvent être très redoutables à long terme [5]. Compte tenu des volumes de plus en plus importants du carburant manipulé aujourd'hui, ces pertes autrefois, sous-estimées à l'échelle financière, deviennent plus critiques pour l'environnement [6]. En effet, les capacités et l'effectif des points de distribution du carburant se multiplient avec la demande explosive en énergie [7]. Ce qui provoque forcément une différence entre les quantités initiales et finales de carburant. Ces écarts peuvent être identifiés à trois niveaux:

- Les quantités commandées sur les quantités reçues;
- Les stocks théoriques calculés contre les stocks physiques mesurés en cuve;
- Les ventes théoriques par rapport aux recettes reçues.

Aussi, dans la recherche des causes, peut-on explorer: la volatilité du produit pétrolier transporté, l'état des infrastructures de stockage et les respirations nocturnes et diurnes des réservoirs de stockage [8]. En plus, il s'ajoute l'exposition permanente des stocks des produits pétroliers à l'échauffement terrestre. Ce paramètre est également peu maîtrisé à cause des incertitudes de la théorie du dérèglement climatique [8, 9]. Les conditions ainsi engendrées pourraient certainement intensifier l'émanation incontrôlée des composés organiques volatils (COV) dans l'atmosphère, à partir du supercarburant des stations-service. On arrive à la problématique des conséquences qui redeviennent les causes entre l'évaporation et l'échauffement terrestre.

En effet, les pertes et pollutions par évaporation du réseau de distribution d'essence, et plus particulièrement des postes d'essence au détail, ont fait l'objet de plusieurs études visant à les contrôler. Selon United States Environmental Protection Agency (USEPA) [10], la concentration de benzène, d'éthylbenzène, de toluène et de xylène autour des maisons situées à 200 mètres de stations-service est plus élevée que les niveaux naturels en milieu urbain. A la suite, European Emission Inventory Guide book ajoute que le secteur de distribution d'essence est à l'origine de 1,5 % à 6,7 % des émissions totales d'origine humaine de composés organiques volatils issus du supercarburant sans plomb. De même, l'Enquête sur les Processus Industriels (EPI) relative à la modélisation ou l'imputation des émissions de polluants, des petites et moyennes entreprises au Canada, a prouvé qu'environ  $58,3 \cdot 10^6$  L d'essence se sont évaporés de quelque 11 200 postes de détail au Canada [11]. Cette investigation a fait cas de ce qu'une grande proportion de ces émissions est imputable à l'essence (27 %) et au diesel (11 %) [11]. Par ailleurs, en France, Baudic [12] a soutenu qu'en 2017, les émissions de COV liées aux pertes par évaporation du carburant constitueraient environ 30% des émissions totales d'Hydrocarbures Non-Méthaniques (HCNM) à l'échelle nationale. Il a ajouté que la composition de ces émissions est fortement dépendante de la nature du carburant qui est étroitement influencées par les conditions météorologiques. Les émissions de COV contribuent à la formation d'oxydants photochimiques tels que l'ozone, qui, à forte dose, peut nuire à la santé humaine et porter atteinte à la végétation et aux matériaux [13]. Si certaines études se sont intéressées aux mécanismes conduisant à ce phénomène, celles relatives à la mise au point d'un stockage, permettant de limiter considérablement les pertes dans l'évolution thermique, l'équilibre gaz-liquide et la thermodynamique du système « réservoir + fluide stocké », n'ont jamais été efficacement déployées. Néanmoins, l'estimation de cette émission a été modélisée par des auteurs dont Serge Forestier [14] et l'INERIS paris [15]. Cependant, outre les systèmes de récupération de vapeurs (SRV) et les soupapes aux événements [16, 17], aucune autre mesure de prévention n'aurait été validée et vulgarisée pour la réduire dans les réservoirs horizontaux. En conséquence, ce phénomène d'émission de gaz de produits pétroliers dans la nature nous a permis d'aborder plusieurs centres d'intérêts scientifiques et socio-économiques. Il s'agissait de s'interroger entre autres, sur les notions de l'efficacité énergétique, du climat et de l'environnement des zones urbaines vulnérables où se réalisait la recherche: la ville de Korhogo, située au nord de la Côte d'Ivoire et repérée entre les coordonnées 9°27'41" Nord et 5°38'41" Ouest [18], dans la zone sub-saharienne, relativement chaude [19]. Korhogo est donc une très bonne illustration des villes équatoriales précaires, aux climats chauds et secs.

A cet effet, notre étude a été inscrite dans le cadre de la protection de l'environnement et de l'économie d'énergie pour rejoindre le principe de ville durable dans l'urbanisation de Korhogo. A la lumière des rapports d'activités, des années 2014 à 2018, des services de la Direction Générale des Hydrocarbures (DGH) de la Côte d'Ivoire, cette région a enregistré une forte consommation de SPb avec une croissance assez rapide de 20% de l'effectif des points de vente. La moyenne des pertes estimées, dans cette période à Korhogo, était de 1,7%, avec un débit moyen de 1000 m<sup>3</sup>/an pour le SPb et de 0,75 % sur un

débit de 400 m<sup>3</sup>/an pour le gasoil (GO). Notons que généralement on admet 0,07%, comme pertes. Aussi, dans les établissements de Korhogo, a-t-il été constaté que les infrastructures de stockage de carburant ont été normalement enfouis dans du sable en fosse maçonnée, à moins de 10 mètres dans le sol. A cette profondeur, règne la géothermie de surface, principalement contrôlée par l'énergie solaire [20] dont le transfert est gouverné par la géologie des roches traversées [21]. De ce fait, l'hypothèse générale adoptée a été donc : « si les propriétés pétrographiques conditionnent le transfert thermique dans le sol, alors l'évaporation au stockage du supercarburant sans plomb enterré dépend de la nature de l'encaissant. Par conséquent, en vue d'atténuer cette évaporation, il faut jouer sur la nature de cet encaissant.

La problématique de cette étude réside dans la gestion de la chaleur ou de la pression au niveau du stockage. Parce que cet échauffement a deux origines principales supposées :

- d'une source exogène au stockage: l'énergie solaire ou terrestre est transmise au réservoir à travers des couches encaissantes;
- d'une émanation endogène au stockage: l'énergie est préalablement emmagasinée dans le fluide au cours du transport et de l'empotage [22].

Dans ce système thermodynamique constitué par ce réservoir enterré, la température a été préférentiellement ciblée par rapport aux autres facteurs, d'où l'adoption du concept d'isolation thermique. Cette technologie a été inspirée à cette étude par la science du confort thermique et l'économie d'énergie des habitats [23]. Elle utilise plusieurs types d'isolants suivant divers critères, conformément aux objectifs visés [24]. Ces matériaux isolants sont d'origines minérales, végétales, animales ou synthétiques et choisis selon les propriétés thermiques, écologiques, architecturales, de facilité de mise en œuvre et la disponibilité locale [24].

## 2 MATERIELS ET METHODE

### 2.1 PRESENTATION DU SUPERCARBURANT SANS PLOMB

Le supercarburant sans plomb est un mélange d'hydrocarbures d'origine minérale ou de synthèse et éventuellement, de composés oxygénés organiques, destiné notamment à l'alimentation des moteurs thermiques à allumage commandé. Selon Eric Le Gentil [25], les essences sont les produits pétroliers fluides les plus légers, avec une possibilité d'évaporation supérieure à 75%, devant les gasoils situés entre 20 à 50%. Une étude comparative entre le super carburant sans plomb et le gasoil est présentée dans le tableau 1 ci-dessous. Dans ces conditions, le supercarburant sans plomb rencontre effectivement un problème de confort thermique, compte tenu de sa volatilité élevée [25].

**Tableau 1. Présentation comparative des échantillons du supercarburant sans plomb et du gasoil [25]**

	Super carburant sans plomb	Gasoil
Consommation locale de Korhogo 2018 (m <sup>3</sup> )	91 810,083	37731, 743
Consommation Nationale 2018 (m <sup>3</sup> )	802 095	1125391
Point d'auto-inflammation (°C)		250
Pression de vapeur (hPa)	350 à 900	1
Point d'ébullition (°C)	30 à 210	160 à 390
Point d'éclair PE (°C)	<-40	PE>55
Evaporation (%)	>75	20 à 50
Densité (Kg/m <sup>3</sup> à 15°C)	<0,8	0,8 à 0,85
Solubilité dans l'eau (mg/L)	100 à 250	Insoluble
Toxicité	Forte	Faible

Le supercarburant sans plomb est caractérisé par une masse volumique inférieure à 0,8 kg.m<sup>-3</sup> à 15 °C, un point d'éclair de -40 °C et une pression de vapeur saturante comprise entre 350 et 900 hPa [25, 26], il est soumis à une évaporation excessive évidente.

### 2.2 ISOLANTS THERMIQUES PRECONISES

Les réservoirs enterrés de carburant sont soumis aux intempéries, à l'humidité, aux organismes vivants, à la poussée des terres et au phénomène d'oxydoréduction du sol [27-29]. En conséquence, une isolation thermique et adéquate est nécessaire.

L'isolant thermique à choisir devrait être adapté au type de sol, localement accessible, potentiellement écologique et présenter une résistance thermique théorique satisfaisante.

A cet effet, conformément aux orientations des études bibliographiques et aux observations de terrain, quatre (4) matériaux ont été identifiés pour être expérimentés, ce sont: le coton, le sable, le tourteau de karité et l'air. Ces quatre (04) matériaux sont d'origines locales. Les caractéristiques de ces matériaux d'isolation thermique sont consignées dans le tableau 2.

**Tableau 2. Caractéristiques des potentiels matériaux d'isolation thermique [30,31-48]**

Numéro	Matériaux	Composition chimique	Propriétés physiques et thermiques	Caractère écologique	Disponibilité/ Accessibilité
1	Coton brut	95% de cellulose 1,6% de protéine 0,9% de cire 0,3% de sucre physiologique	$\lambda = 0,055 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; $\rho = 20-60 \text{ kg/m}^3$	Part de consommation mondiale: 11% des pesticides et 25 % des insecticides; 6,78 kg CO <sub>2</sub> /kg de GES à la production	Production ivoirienne: plus de 470 000 t en 2018 avec un prix bord champ de 88 cents/lb
2	Tourteau de karité	8 à 25% de protéine 2 à 20% de lipide 48 à 67,5% de glucides 5 à 12% de fibre.	$0,040 \leq \lambda \leq 0,18 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , Poudre boisée compactable	Produit végétal non toxique, issu de la fabrication du beurre de karité qui est comestible, médical et anti-oxydant.	culture sauvage et saisonnière, disponibilité faible produit à plus de 30 495 à 20 185 tonnes de 2007 à 2010, Accessibilité élevée: 50 FCFA le kg en 2018.
3	Sable	Silicium Oxyde d'aluminium Oxyde de fer Oxyde de calcium.	$2 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , roche détritique	Risque de pneumoconioses par inhalation chronique.	Matériau usuel pour le stockage enterré de produits pétroliers.
4	Air	78,09 % d'azote 20,95 % d'oxygène 0,93 % d'argon 0,03 % d'anhydride carbonique.	$0,024 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; fluide	Naturellement non toxique	Abondant et pratiquement gratuit

### 2.3 DISPOSITIF D'ÉVALUATION DU TAUX D'ÉVAPORATION

Le supercarburant sans plomb dont les spécificités ont été décrites dans le tableau 1, a été conditionné dans six (6) réservoirs identiques fabriqués en acier galvanisé. Cet ensemble a constitué notre station expérimentale équipée en matériel de mesure. Le dispositif de la station expérimentale est présenté sur la figure 1. Les plans et coupes AA et BB de la figure 1 en précisent les dimensions schématisées.

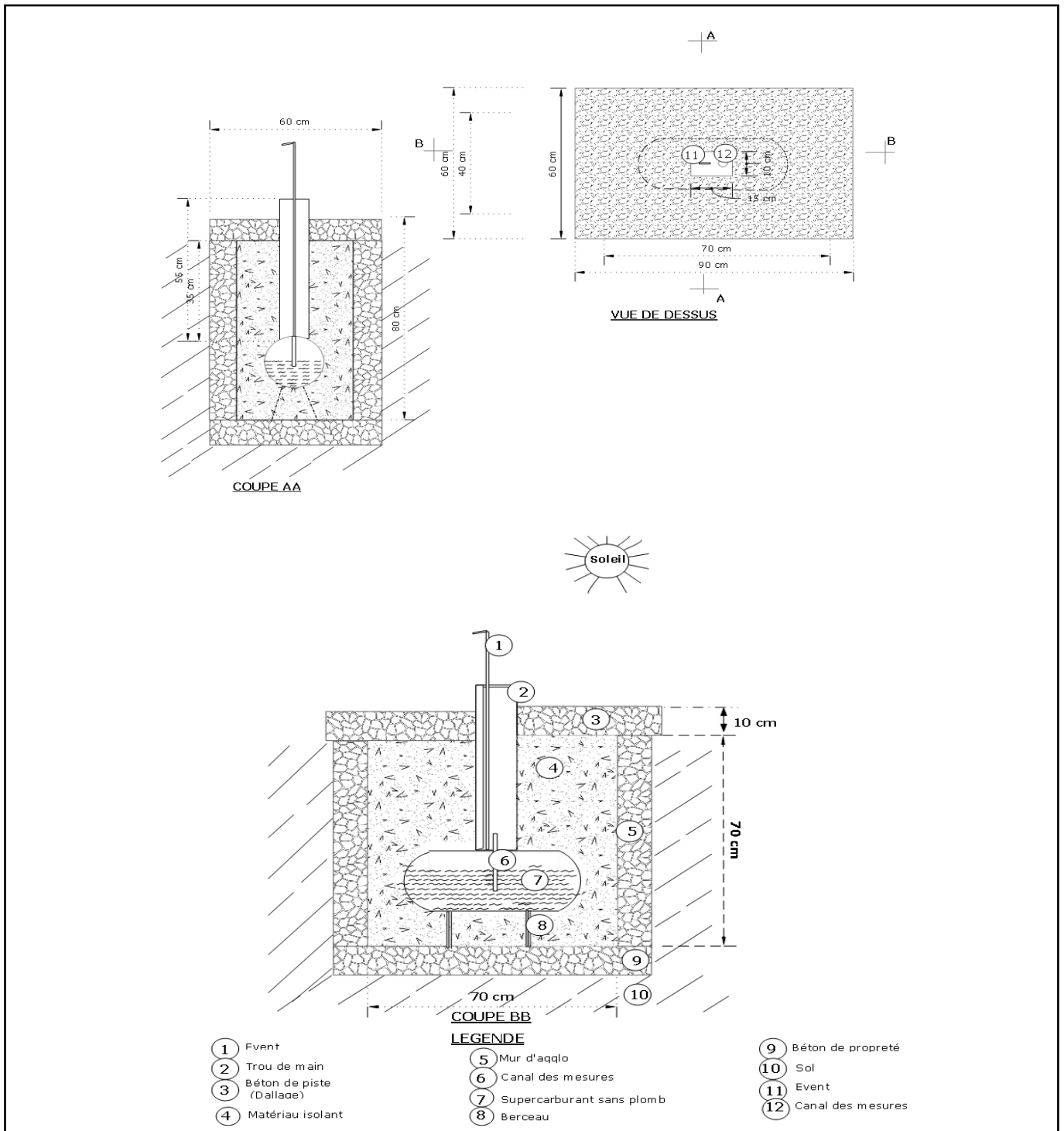


Fig. 1. Plan et coupes descriptifs du dispositif de stockage

Les récipients de stockage sont de forme cylindrique, de diamètre 20 cm, de longueur 50 cm, d'épaisseur 2mm et d'une capacité de 15,70 litres. Ils ont été posés chacun, dans une fosse maçonnée étanche et parallélepédique rectangle de dimensions 1,10 m × 0,40 m × 0,80 m, soit 0,0157 m<sup>3</sup> de chaque isolant correspondant à une couche d'environ 35 cm au plafond. Les côtés latéraux et le chaumier ont encaissé une épaisseur moyenne de 10cm du matériau d'isolation. Les différentes fosses les contenant ont été maçonnées et implantées à intervalles réguliers de 1 m, pour prévenir toute interférence thermique et infiltration de fluide corrosifs. Chaque réservoir a été doté d'une jauge métallique et d'un évent de respiration de diamètre 2 cm. Les figures 2A, 2B et 2C montrent les différentes phases d'installation de la station expérimentale avec la coupe transversale d'une installation.



La figure 2A présente l'installation du réservoir dans la fosse maçonnée en attente de matériau isolant.



La figure 2B illustre le barremage, l'enfouissement dans le matériau isolant du réservoir et la prise des mesures initiales.



La figure 2C est la vue de la station expérimente où est représenté chaque matériau par réservoir enterré : le sable, le tourteau de karité, l'air, le coton et une fosse réserve

Fig. 2. Installation de la station expérimentale

Au terme de l'installation de ladite station expérimentale, tous les échantillons disposaient d'une règle de mesure de stock en forme de (T), d'un stock de départ ( $S_0$ ) caractérisé par une hauteur ( $H_0$ ), d'une densité ( $D_0$ ) et d'une température initiale ( $T_0$ ) connues. La collecte des mesures relatives aux levées simultanées des températures ambiantes, des températures du fluide, des volumes résiduels et des pressions atmosphériques, a été effectuée à intervalles de temps réguliers de 2 heures. Les mesurages ont couvert 30 jours: du 24 mars au 22 avril 2020, pour le test de sélection des matériaux permettant d'estimer le taux d'évaporation au niveau de chaque matériau d'isolation proposé. Cette période était la plus chaude des années antérieures à Korhogo [49,50]. Les volumes mesurés ont été ensuite corrigés aux dimensions universelles, selon la Norme API [51]. Cette conversion obéit à la procédure, à quatre étapes, suivante:

- mesures simultanées des volumes, température et densité du fluide ambiant;
- correction de la densité à 15°C du liquide;
- choix du facteur de correction ( $C_c$ ), correspondant à la température du fluide;
- multiplication du facteur identifié par le volume ambiant ( $V_{ap}$ ) selon la relation (1).

$$V_{15^{\circ}\text{C}} = V_{ap} \times C_c \quad (1)$$

Les différentielles volumiques ou taux de pertes cumulées à l'instant  $i$  ( $E_i$ ) de carburant ont été déterminées par la formule (2) suivante, qui exprime la somme de tous les écarts élémentaires relatifs. Ces écarts volumiques ont permis de calculer les vitesses d'évaporation ( $V_i$ ) avec la relation (3) et le taux de non-évaporation ( $E'_i$ ) avec la formule (4).

$$E_i = \sum_{i=0}^n \frac{(S_i - S_{i+1})}{S_i} \times 100 \quad (2)$$

$$V_i = \frac{dS_i}{dt} \quad (3)$$

$$E'_i = 1 - E_i \quad (4)$$

#### 2.4 SÉLECTION DÉFINITIVE DES MATÉRIEAUX CONSTITUTIFS DU STOCKAGE À PARTIR DES CRITÈRES

Un classement des quatre matériaux isolants dans l'ordre des critères de choix a été engendré, intégrant l'analyse multicritère (AMC) associée au logiciel EXCEL. C'est une approche analytique d'aide à la décision. Elle permet d'agréger plusieurs critères, en vue de la sélection optimale d'une ou plusieurs actions. Dans le cadre de cette étude, l'on a dû sélectionner des matériaux parmi les quatre indiqués, en fonction des huit (8) critères de choix consignés dans le A cet effet, deux méthodes d'analyse multicritères ont été utilisées successivement: l'analyse multicritère de Thomas Saaty [52] et l'analyse multicritère de Ziont-Wallenius (1980) [52].

La méthode de Thomas Saaty a consisté d'abord à une comparaison binaire critères de choix de matériau. Il s'est agi d'attribuer des valeurs numériques à des jugements subjectifs relativement à l'importance d'un facteur par rapport à un autre. Ces jugements s'appuient sur une échelle prédéfinie par Thomas Saaty [60]. Afin de rendre compte de la cohérence des appréciations, l'indice de cohérence (IC) et le ratio de cohérence (RC) ont été déterminés avec une cohérence aléatoire (CA) de 1,41, définie par Thomas Saaty [60], pour les 8 critères étudiés. Les appréciations sont dites cohérentes si le ratio de cohérence (RC) est inférieur à 1/10. La relation 5 suivante a permis de calculer l'indice de cohérence (IC).

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

Avec  $\lambda_{\max}$ : la valeur propre de la matrice engendrée et  $n$ : le nombre de critères étudiés.

Ensuite, il a été effectué un classement des matériaux dans ordre des critères de performance ou contraintes, en associant la méthode Ziont-Wallenius. Il s'agissait de réaliser un arrangement des matériaux dans le repère des critères de choix. Enfin, ces matériaux ainsi sélectionnés ont permis de construire un stockage intelligent dénommé « Eco1-stoc », dont la capacité de réduction de l'évaporation a été mesurée par rapport aux systèmes de stockage existants ou simulés, en fonction des données thermodynamiques collectées.

Tableau 3. Justification des critères de choix ou contraintes de sélection des matériaux isolants

Numéro	Critères de choix de matériau	Justification des critères
1	Conductivité thermique ( $\lambda$ )	De préférence la conductivité doit être faible pour un besoin d'isolation thermique,
2	Energie grise (Eg)	Le mieux pour l'étude est que l'Energie grise soit moindre et donner un caractère plus écologique.
3	Accessibilité financière (Ac)	Le coût par rapport l'acquéreur ou une autre alternative doit être abordable.
4	Disponibilité locale (Qd)	Le matériel doit être à la disposition de l'utilisateur à temps voulu et en quantité suffisante.
5	Recyclabilité (Rt)	Le matériau doit être récupérable à remettre en usage sous forme de matière première et donner un caractère plus écologique.
6	Tenue dans le temps (Tv)	Tenue dans le temps est voulue longue pour les matériaux choisis pour être plus économique et durable pour l'environnement.
7	Mise en œuvre (Wo)	Une technologie d'installation plus aisée et facile est ici souhaitée pour être plus soutenable.
8	Taux d'évaporation enregistré (Ev)	Le taux d'évaporation est l'indicateur de performance du système de stockage ou de protection, quand cette valeur est minimale.

## 2.5 CONCEPTION DE L'ECO1-STOC

### 2.5.1 INSTALLATION DE L'ECO1-STOC

Les mêmes fosses maçonnées précédentes employées pour sélectionner les matériaux, ont été encore une fois utilisées pour l'évaluation du nouveau stockage inventé. La figure 3 permet de mieux appréhender ce dispositif de stockage, dénommé Eco1-stoc. Sur cette figure 3, deux (2) matériaux écologiques choisis, tactiquement combinés, ont permis de construire et d'espérer atteindre les fonctions assignées à ce nouveau système de stockage dénommé. En effet, avec des proportions rationnellement étudiées, le matériau le plus thermiquement résistant va s'interposer entre le réservoir et le flux incident de chaleur. Il a été posé à-même le mur de la fosse maçonnée. Quant au matériau thermiquement plus conducteur, il assure le rôle de pont thermique et évacue la chaleur qui a dû s'accumuler à proximité du carburant.



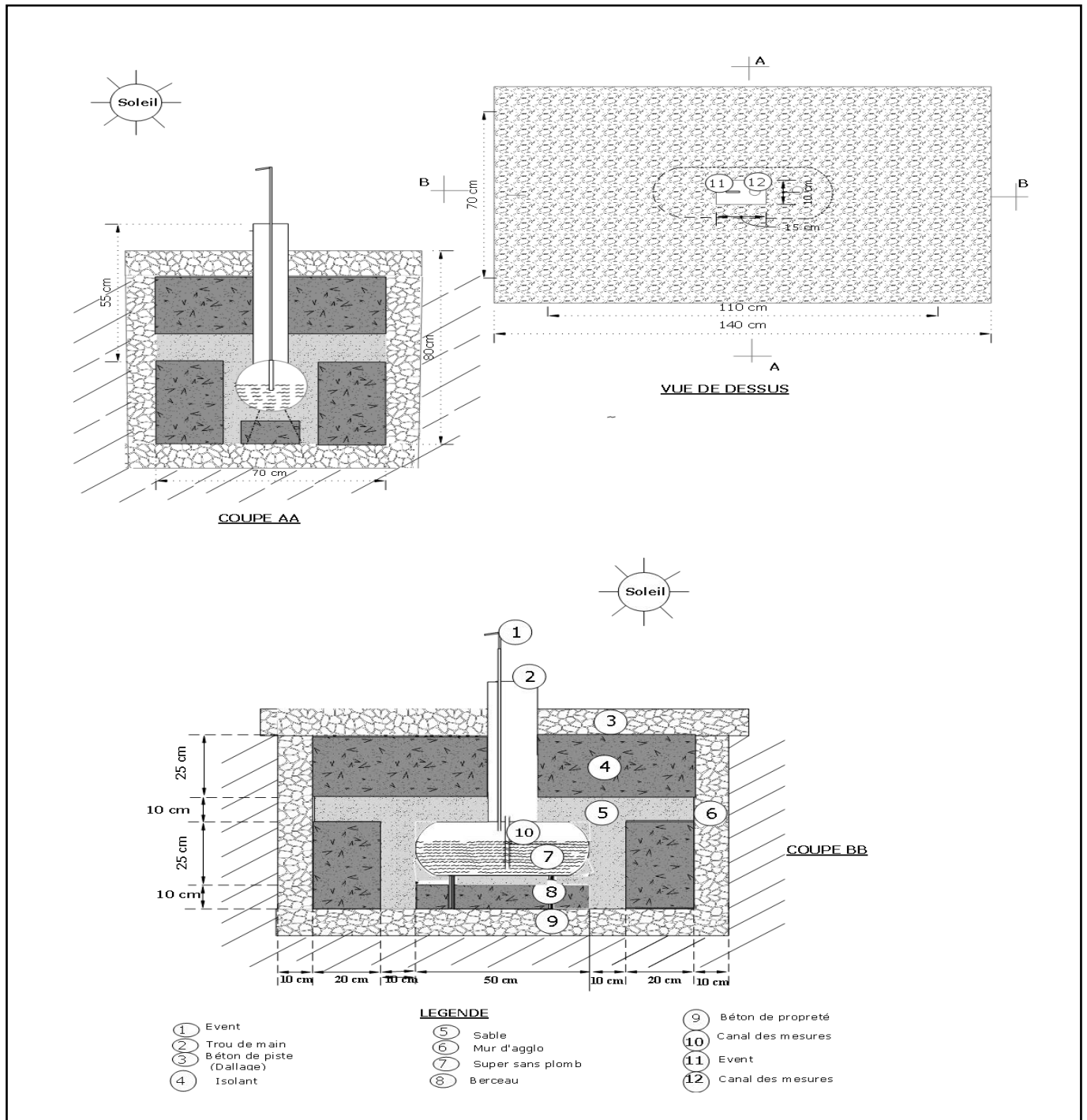


Fig. 3. Installation de l'Eco1-stoc

## 2.5.2 EVALUTION DE L'ECO1-STOC

L'évaluation de l'Eco1-stoc s'est déroulée du 01 au 30 mai 2020, dans les mêmes logique et procédure que dans le cas de l'évaluation des matériaux en vue du choix. L'échantillon de référence était toujours celui à sable, à l'instar du stockage conventionnel constitué du réservoir enfoui dans du sable en fosse maçonnée, des stations-service urbaines. Les autres échantillons, tels que le coton, l'air et le tourteau de Karité, ont été partiellement pris en compte. A l'issue de cette expérience, on définit le quotient expérimental du taux d'évaporation ( $E_n$ ) du nouveau système de stockage par rapport au taux d'évaporation du stockage conventionnel ( $E_o$ ). Ce quotient correspond au Ratio de perte ( $R_o$ ). Ce ratio permet d'estimer les pertes projetées ( $E_p$ ) avec l'Eco1-stoc grandeur nature, au vu des pertes actuelles ( $E_a$ ) enregistrées sur le terrain. La plus-value ( $B_v$ ) engendrée par le nouveau stockage conçu correspond à l'économie des pertes, soit la différence entre la perte effective ( $E_a$ ) et la perte projetée ( $E_p$ ), conformément aux formules 6, 7 et 8.

$$R_0 = \frac{E_n}{E_0} = \frac{E_p}{E_a} \quad (6)$$

$$E_p = R_0 \times E_a \quad (7)$$

$$B_v = E_a - E_p \quad (8)$$

Le rendement de cette matrice de stockage est fonction de la disposition et des propriétés physico-thermiques des couches encaissantes engagées. Ce rendement va dépendre du Ratio (Rr) des résistances thermiques des matériaux intrants. Il s'agit du quotient de la plus forte résistance thermique (R1) sur la plus faible (R2), comme le présente la formule (9). Si R1 est supérieur ou égal à R2, l'évacuation de la chaleur interne au système serait presque impossible à travers les matériaux encaissants, si ce n'est par l'évent. Dans le cas inverse, ce rendement sera optimum où le maximum des flux thermiques internes et externes sont renvoyés dans l'atmosphère.

$$Rr = \frac{R1}{R2} \quad (9)$$

Ainsi, plus Rr est relativement élevé, plus l'accès de la chaleur exogène au fluide est difficile et plus l'évacuation de la chaleur interne est facile.

### 3 RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 RESULTATS

##### 3.1.1 EVOLUTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA PRESSION EN FONCTION DU TEMPS

Les figures 4 et 5 présentent la variation de la température du supercarburant sans plomb par matériau et de la pression atmosphérique en fonction du temps.

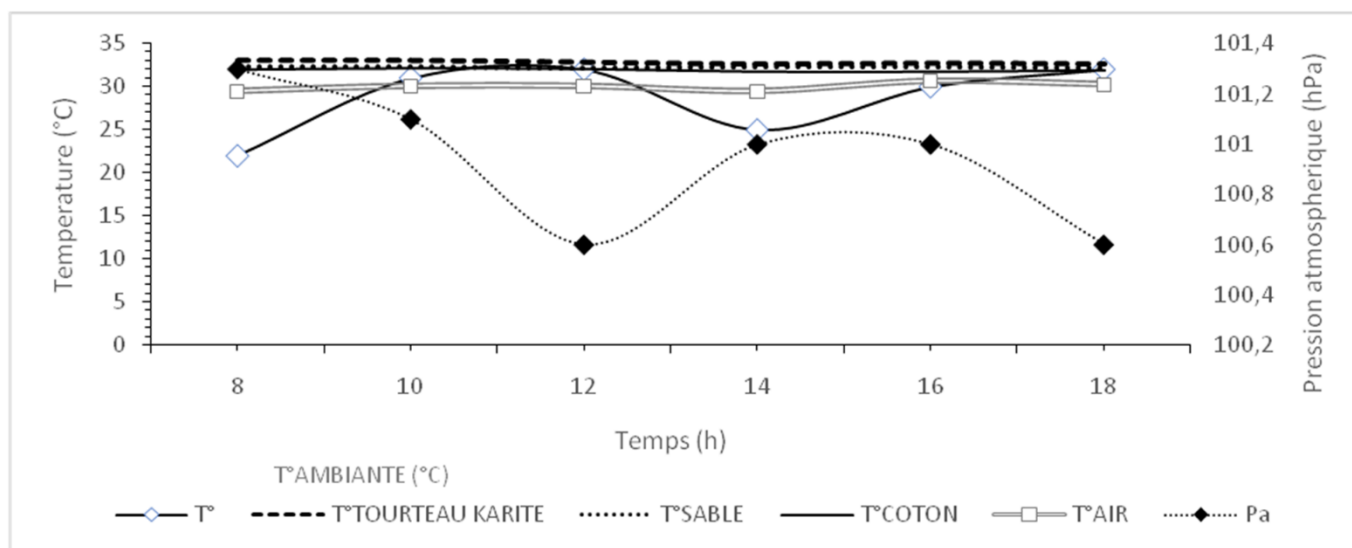


Fig. 4. Evolution des températures et pressions du 24/03/2020

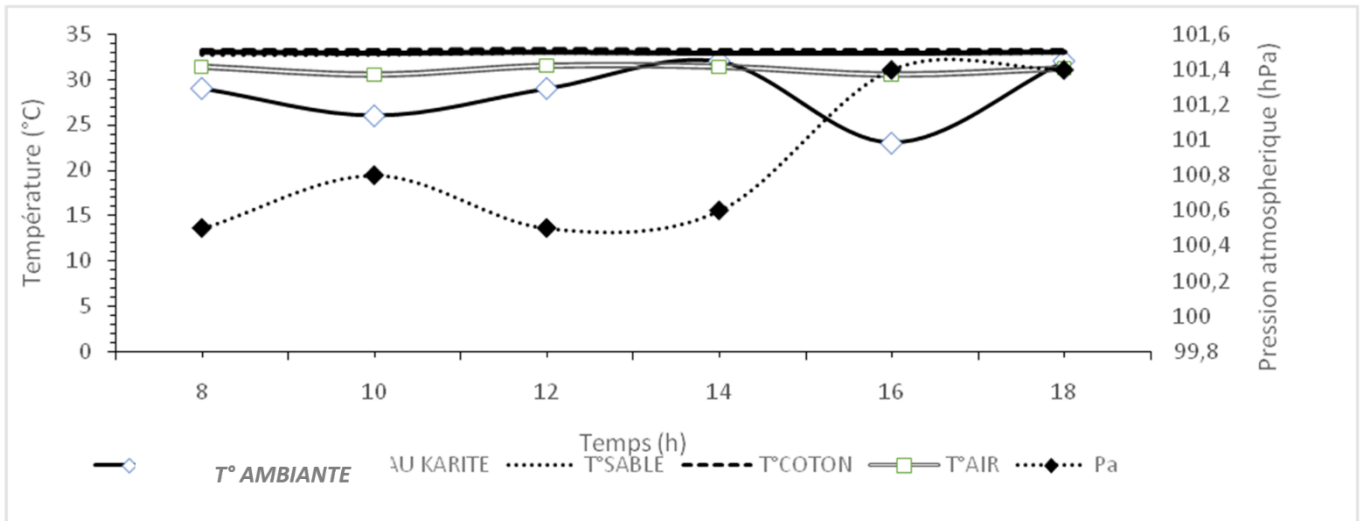


Fig. 5. Evolution des températures et pressions du 31/03/2020

A l'analyse de ces figures 4 et 5, il ressort que les profils des courbes des températures et pressions, présentent des particularités respectives plus ou moins interdépendantes. Les sinusoides relatives à la pression à l'air et au sable épousent la même périodicité que celle de la température ambiante. Néanmoins les amplitudes ont été très différenciées et variaient entre 5 et 20°C pour les températures. Toutefois les pressions et les températures évoluent dans le même sens que la température du fluide dans l'échantillon à air. Cependant, les températures des échantillons à coton, à sable et surtout celle à tourteau de karité demeurent quasi stables, au voisinage de 33°C, relativement plus élevées avec un écart maximum de 10°C de l'échantillon à l'air et de la température ambiante. En effet, conformément à ces remarques, la courbe sinusoidale de température ambiante avait une parfaite similitude avec l'évolution de la température de l'échantillon à air, alors que les courbes respectives de tourteau de Karité, de coton et du sable restaient presque constamment horizontales, comme le montrent les figures 4 et 5. Il est donc déductible que plus la résistance thermique du matériau encaissant le réservoir est élevée, moins le carburant stocké subit la variabilité thermique ambiante et plus sa température est élevée.

La figure 6 présente l'évolution généralisée des températures et pressions, en fonction du temps sur 30 jours, de chaque échantillon conditionné par un isolant donné. Elle confirme les observations des figures 4 et 5.

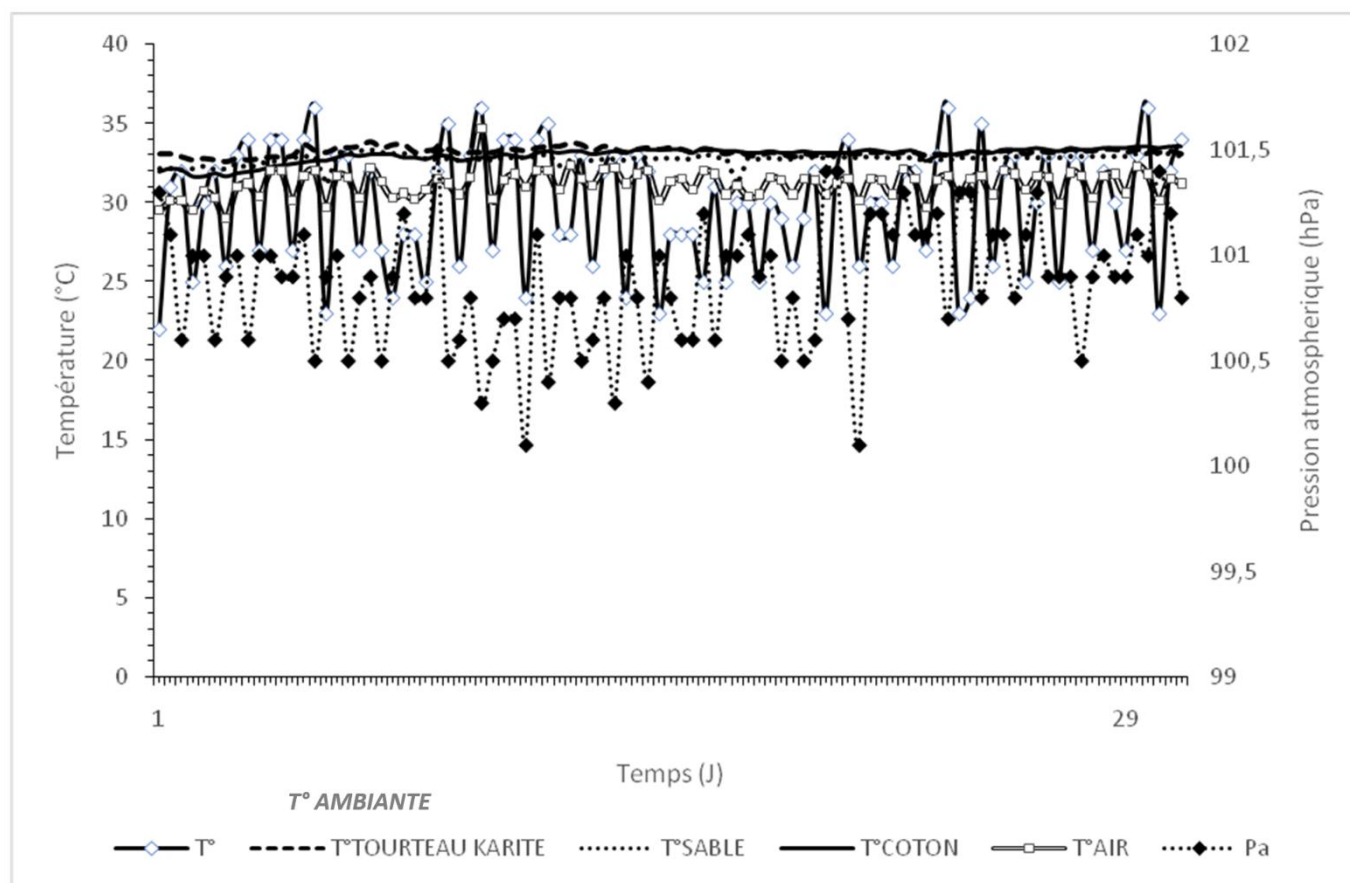


Fig. 6. Evolution des températures et pressions par échantillon du 24/03/2020 au 23/04/2020

L'analyse de ces figures 4, 5 et 6 révèle:

- plus l'isolant a une résistance élevée, moins la variabilité thermique du fluide est influencée par la température ambiante. Néanmoins, la température reste relativement plus élevée au niveau des échantillons;
- à l'exception des autres matériaux, seul l'isolant " air " a donné une allure des températures qui épouse paradoxalement et quasiment celle des températures externes, conformément à l'étude de Tibor Poòs [53];
- le tourteau de Karité amortit mieux la variabilité de la chaleur incidente par rapport au coton et sable.

Ainsi, la barrière thermique que constitue l'isolant a amorti le flux incident et le fluide a emmagasiné la fraction de chaleur transmise et reçue, jusqu'à la limite de sa capacité thermique. Néanmoins, en dépit de cette logique, l'air ayant une très forte résistance thermique, a montré l'inverse avec l'échantillon qu'il protégeait. Cela est dû à la difficulté de confinement de l'air dans le sol, car il est un bon isolant quand il est parfaitement isolé.

### 3.1.2 EVOLUTION RELATIVE DES VOLUMES RESIDUELS PAR RESERVOIR EN FONCTION DU TEMPS

Dans le cadre de l'analyse du taux d'évaporation du supercarburant sans plomb par matériau, le contrôle des volumes résiduels, a permis de voir leurs évolutions en fonction du temps. Les figures 7, 8 et 9 présentent l'évolution du volume résiduel sur trois jours distincts.

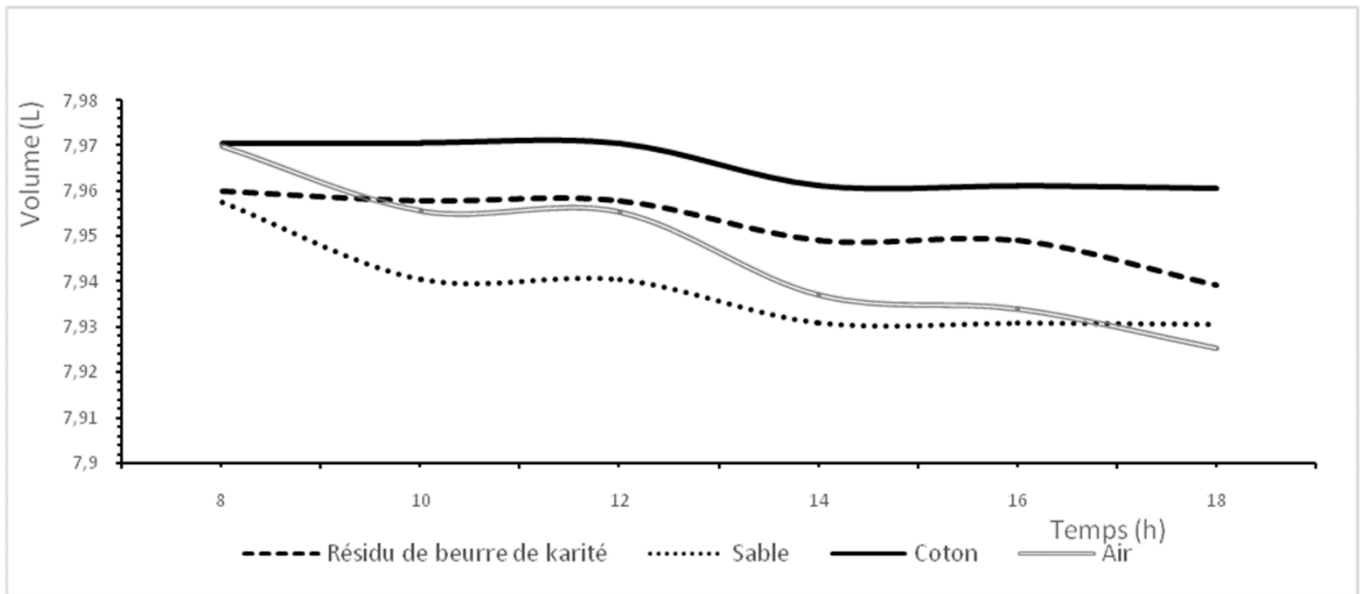


Fig. 7. Evolution du volume résiduel du 24/03/2020

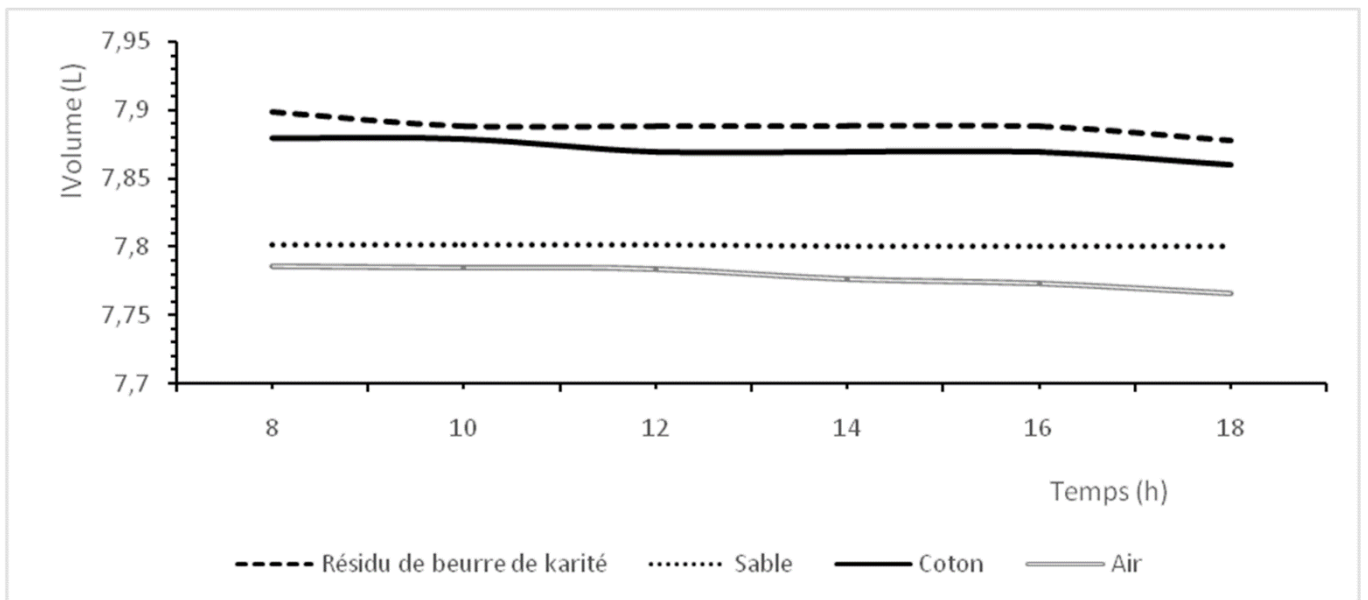


Fig. 8. Evolution du volume résiduel du 31/03/2020

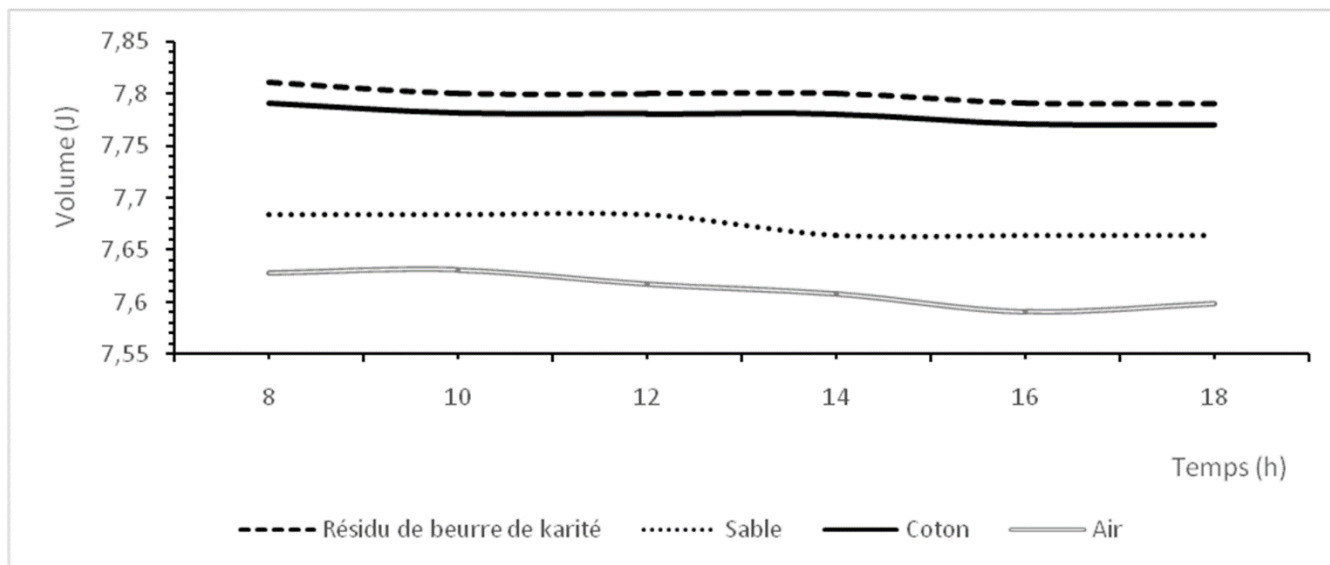


Fig. 9. Evolution du volume résiduel du 08/04/2020

On observe sur ces figures 7, 8 et 9, une décroissance des volumes résiduels du supercarburant sans plomb. Il convient de faire remarquer que la courbe relative au tourteau de karité demeure au-dessus des autres devant celle du coton. La courbe du sable était la plus, en dessous après celle de l'air. Cette disposition des courbes dans ce référentiel implique que les courbes les plus en dessous perdaient plus en volume que celles qui sont au-dessus. Ainsi, le tourteau de karité a conservé mieux le carburant que le coton et le sable qui ont fait évaporer, le plus de fluide devant l'air.

La généralisation de cette observation a permis d'avoir la figure 10, présentant l'évolution des volumes résiduels du supercarburant sans plomb sur 30 jours.

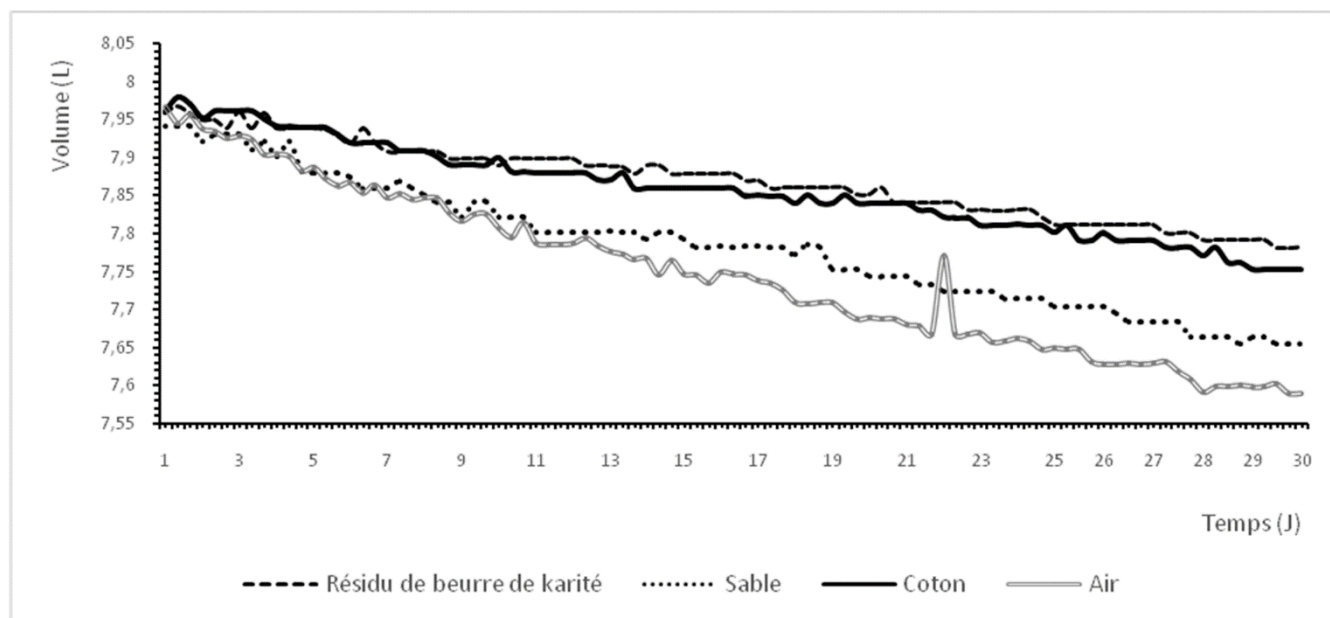


Fig. 10. Evolution de volumes résiduels par matériau du 24/03/2018 au 23/04/2018

Ces courbes de la figure 10 sont assimilables à quatre droites apparentées à chaque isolant. L'équation générale réduite desdites droites, avec  $S_i$  les stocks résiduels au moment  $T_i$ ;  $V_i$ , la pente de la droite et aussi vitesse d'évaporation du stock par matériau donné avec  $S_0$  ordonnée à l'origine et stock initial, est présenté par la formule (10):

$$S_i = S_0 - V_i T_i \quad (10)$$

A l'analyse de la figure 10, on a:  $V_{\text{tourteau}} \leq V_{\text{coton}} \leq V_{\text{sable}} \leq V_{\text{air}}$ . Cet arrangement illustre l'ordre d'évaporation dans l'ensemble des échantillons étudiés. L'évaporation avec le tourteau de karité est donc la plus lente, avec une vitesse de  $25.10^{-5}$  l/h. Elle avoisinait et restait inférieure à celle du coton ( $29.10^{-5}$  l/h).

### 3.1.3 BILAN MATIERE, TAUX D'ÉVAPORATION ET TEMPERATURE MOYENNE PAR MATERIAU

La mise en épreuve de chaque échantillon a été suivie par l'évaluation successive des pertes volumiques, des vitesses et taux d'évaporation et surtout de situer la valeur de la conductivité thermique du tourteau de karité. Les résultats obtenus ont été enregistrés dans le tableau 4, qui renseigne sur l'échauffement et les pertes du fluide par isolant.

Tableau 4. Classification des isolants dans l'ordre des facteurs de pertes respectifs enregistrés

		Vitesse d'évaporation, $V_m$ (l/h)	Température moyenne du fluide (°C)	Pertes par isolant $E_i$ (L) et (%)		Taux de non-évaporation $E'_i$ (%)	Conductivité thermique théorique $\lambda$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	Conductivité estimée du tourteau de Karité ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
1	Tourteau de karité	$-200.10^{-5}$	33,23	0,18	9,19	90,81	$0,040 \leq \lambda \leq 0,18$	$V_{\text{karité}} \leq V_{\text{coton}}$ alors $\lambda_{\text{karité}} \leq \lambda_{\text{coton}}$ $\lambda_{\text{karité}} \leq 0,055$
2	Coton	$-360.10^{-5}$	33,04	0,21	10,71	89,29	0,055	
3	Sable	$-960.10^{-5}$	32,79	0,29	14,95	85,05	02	
4	Air	$-270.10^{-5}$	31,15	0,38	19,32	80,68	0,024	
Température Ambiante moyenne		29.70 °C						

L'analyse du tableau 4 révèle que l'évaporation croît proportionnellement dans le même sens que la conductivité thermique et inversement à la température du fluide. Cependant, en dépit de sa faible conductivité thermique ( $0,024 W.m^{-1}.K^{-1}$ ), l'air a été paradoxalement l'isolant qui a connu la plus forte évaporation (19,32%). Tandis que, le tourteau de karité, dont la conductivité thermique est plus élevée, a mieux préservé le fluide (9,19%). On en déduit que l'excès d'évaporation avec l'air a dû être une exception causée par une perte de confinement de la chambre à air ou de la fosse. Il a été donc observé et retenu que:

- plus le fluide est chaud moins il a subi de perte;
- compte tenu du caractère linéaire de la relation entre volume résiduel et résistance thermique, on pourrait déterminer graphiquement les positions relatives des conductivités thermiques les unes par rapport aux autres par les méthodes de Thales et d'interpolation linéaire.

### 3.1.4 ETAT DE LA HIERARCHIE DES CRITERES DE CHOIX PAR ORDRE D'IMPORTANCE RELATIVE

Le tableau 5 affiche la matrice résultante des jugements et de la classification effectuée avec les différents critères de choix de matériau, au moyen de l'analyse multicritère de Thomas Saaty. Chaque case du tableau renseigne de l'importance du paramètre de la colonne à celui de de la ligne. Cette matrice a permis de calculer la moyenne géométrique, le poids et le rang de chaque paramètre dans l'ensemble ainsi que le ratio de cohérence (RC).

Le tableau 5 présente la classification des huit (8) critères de choix en fonction de leur importance relative respective. Ainsi, on note dans cet ordre: 1<sup>er</sup>/le taux d'évaporation, 2<sup>ième</sup>/la conductivité thermique, 3<sup>ième</sup> /l'énergie grise, 4<sup>ième</sup> /la disponibilité, 5<sup>ième</sup> /la recyclabilité, 6<sup>ième</sup> /la tenue dans le temps, 7<sup>ième</sup> /l'accessibilité et 8<sup>ième</sup> /la mise en œuvre. Le fait que le ratio de cohérence, RC (0,0497) ait été inférieur à 1/10, a rassuré de l'efficacité du jugement opéré, conformément à la logique de Thomas Saaty [52]. Le facteur le plus déterminant dans le choix est donc le taux d'évaporation ( $E_v$ ) avant la conductivité thermique ( $A$ ). La mise en œuvre ( $w_o$ ), bien qu'ayant un caractère très technologique, vient en dernière position.

Tableau 5. Classification des critères de choix en fonction de leur priorité respective

	Taux d'évaporation	Conductivité thermique	Disponible	Energie grise	Recyclabilité	Durée de vie	Accessibilité	Mise en oeuvre	Moy.géo	Poids	Priorité
Taux d'évaporation	1,000	2,000	3,000	3,000	9,000	5,000	3,000	7,000	25,718	0,572	1
Conductivité thermique	0,500	1,000	3,000	3,000	5,000	5,000	3,000	7,000	13,319	0,296	2
Disponibilité	0,330	0,330	1,000	1,000	3,000	5,000	1,000	7,000	2,268	0,050	4
Energie grise	0,330	0,330	1,000	1,000	3,000	5,000	2,000	5,000	2,554	0,057	3
Recyclabilité	0,110	0,200	0,330	0,330	1,000	2,000	0,330	2,000	0,149	0,003	5
Durée de vie	0,200	0,200	0,200	0,200	0,500	1,000	1,000	3,000	0,134	0,003	6
Accessibilité	0,330	0,330	1,000	0,500	3,000	1,000	1,000	3,000	0,794	0,018	7
Mise en oeuvre	0,140	0,140	0,140	0,200	0,500	0,330	0,330	1,000	0,032	0,001	8
Somme	2,954	4,543	9,676	9,233	25,000	24,333	11,667	35,000	44,967	1,000	
Avec : $RC = \frac{IC}{IA}$ ; $IC = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1}$ et $\lambda_{max} = 8,49091$											
RC = 0,0497 ≤ 0,1 soit 4,97%											

### 3.1.5 ETAT DE LA CLASSIFICATION DES MATERIAUX PAR ORDRE DES CRITERES DE CHOIX

La méthode de Thomas Saaty [52] a engendré la matrice des poids relatifs des matériaux dans la référence des huit (8) critères précédents. Elle a aussi généré la classification des matériaux en fonction desdits critères de choix, selon le tableau 6.

Tableau 6. Classement des matériaux en fonction des critères de choix

	Taux D'évaporation 1	Conductivité thermique 2	Energie grise 3	Disponibilité 4	Recyclabilité 5	Durée de vie 6	Accessibilité 7	Mise en oeuvre 8	Poids	No Priorité
Tourteau Karité	0,3143	0,0506	0,0010	0,0179	0,0007	0,0001	0,0002	0,0002	0,3844	1
Air	0,0217	0,2133	0,0465	0,0416	0,0026	0,0017	0,0125	0,0001	0,3400	2
Coton Brut	0,1799	0,0296	0,0022	0,0022	0,0007	0,0004	0,0008	0,0005	0,2153	3
Sable	0,0577	0,0036	0,0069	0,0055	0,0005	0,0011	0,0018	0,0002	0,0773	4

Le tableau 6 illustre le classement de matériaux par ordre de priorité. Le tourteau de karité a été le meilleur matériau et a eu le plus faible taux d'évaporation avant l'air. Le sable était le dernier dans le rang avec une conductivité thermique plus élevée.

### 3.1.6 PRESENTATION DU STOCKAGE ECOLOGIQUE (Eco1-Stoc) CONSTRUIT A PARTIR DES MATERIAUX CHOISIS

A la suite de la classification des isolants, deux (02) meilleurs matériaux aux propriétés complémentaires se sont imposés pour conduire l'expérience à terme. Il s'agissait du sable et du tourteau de karité. L'Eco1-stoc est constitué d'une fosse maçonnée de 110 cm de longueur, 80 cm de largeur et 80 cm de profondeur dans laquelle le réservoir de carburant est logé avec un jeu de deux isolants choisis:

- Le sable: Il a été relativement le plus conducteur thermique et le moins oxydant afin de protéger le réservoir. Dans cette matrice, le sable a été disposé à même le réservoir et partiellement mis en contact avec le mur de la fosse maçonnée, formant ainsi, le pont « thermique-échappement » en vue d'éviter l'accumulation de chaleur aux alentours du réservoir.



Ainsi, une épaisseur de 10cm et de masse volumique  $4,52 \text{ g/cm}^3$ , a été mise en contact direct avec le réservoir, pour un volume de  $0,542 \text{ m}^3$ :

- Le tourteau de karité: comme il avait la plus forte résistance thermique, il a été installé entièrement contre la paroi de la fosse maçonnée. Le tourteau de karité a constitué ainsi, la « barrière thermique-réflexion » principale qui amorti l'intensité de la chaleur exogène. A cet effet, il a été employé une épaisseur horizontale de 40 cm, de masse volumique  $0,52 \text{ g/cm}^3$  et une épaisseur latérale de 20cm, soit  $0,202 \text{ m}^3$  de tourteau de karité. La figure 11 présente la configuration de ce modèle de stockage.

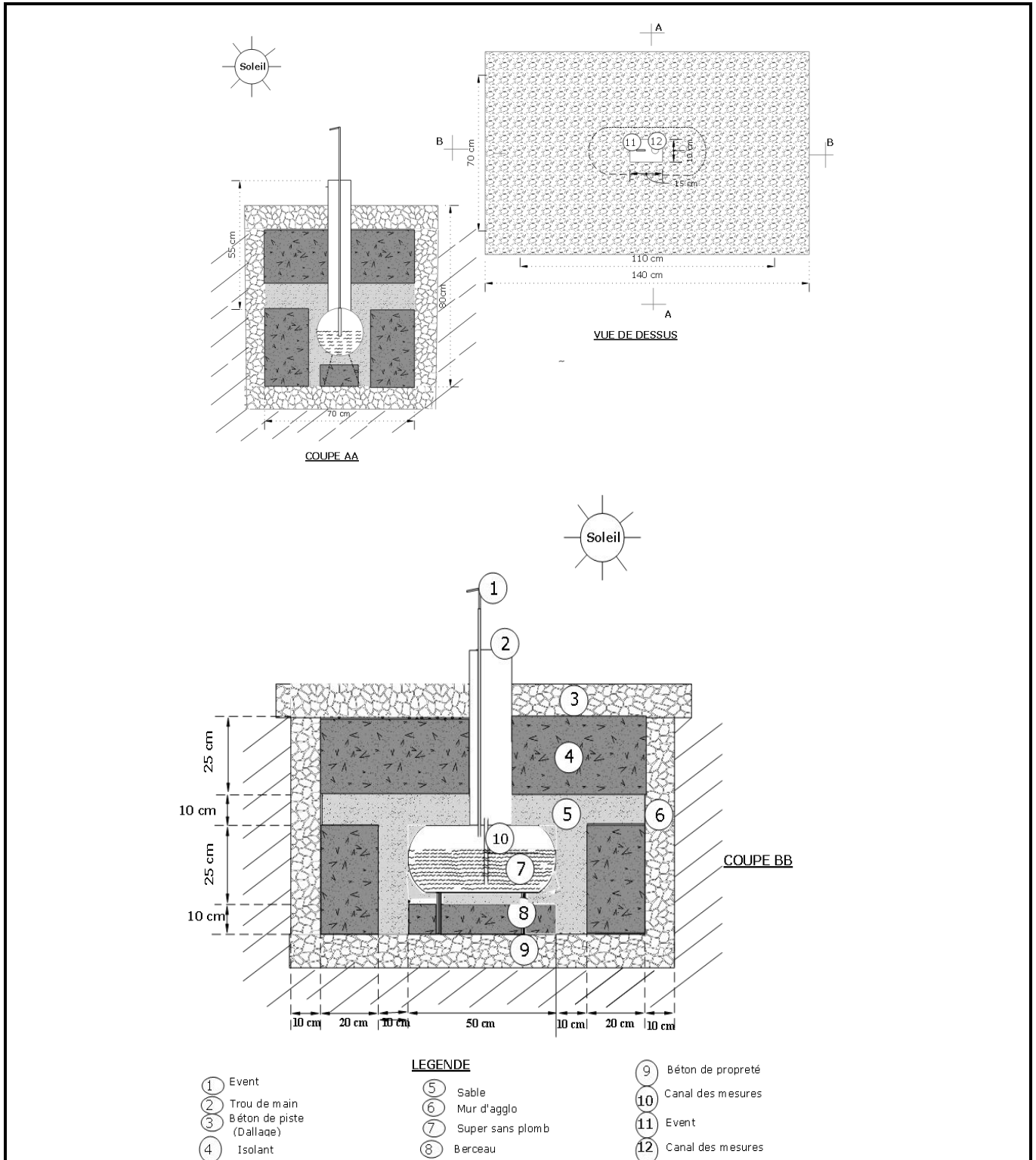


Fig. 11. Schéma du stockage intelligent (Eco1-stoc) conçu

L'efficacité de l'Eco1-stoc a résulté de la disposition des matériaux en fonction de leurs propriétés thermiques respectives. Le carburant peut arriver au stockage avec une température quelconque, ayant une influence plus ou moins prononcée sur sa volatilité. A cet effet, le défi est de faire dissiper toute accumulation de chaleur à l'intermédiaire d'un pont thermique que constituait la couche conductrice de sable et faire réfléchir le maximum de flux incident de chaleur avec la barrière thermique du Tourteau de karité.

Le ratio de l'Eco1-stoc est supérieur à 0,70%. Ce qui présage d'un bon équilibre thermique du stockage inventé.

### 3.1.7 PRESENTATION ANALYTIQUE DES PERTES CUMULEES PAR RAPPORT A L'ECO1-STOC

Dans le cadre de l'évaluation de la performance de l'Eco1-stoc, il a été réalisé un suivi continu des volumes résiduels par matériau. L'enregistrement des différentiels volumiques sur trois jours distincts, a contribué à l'établissement des pertes cumulées (figures 12; 13 et 14).

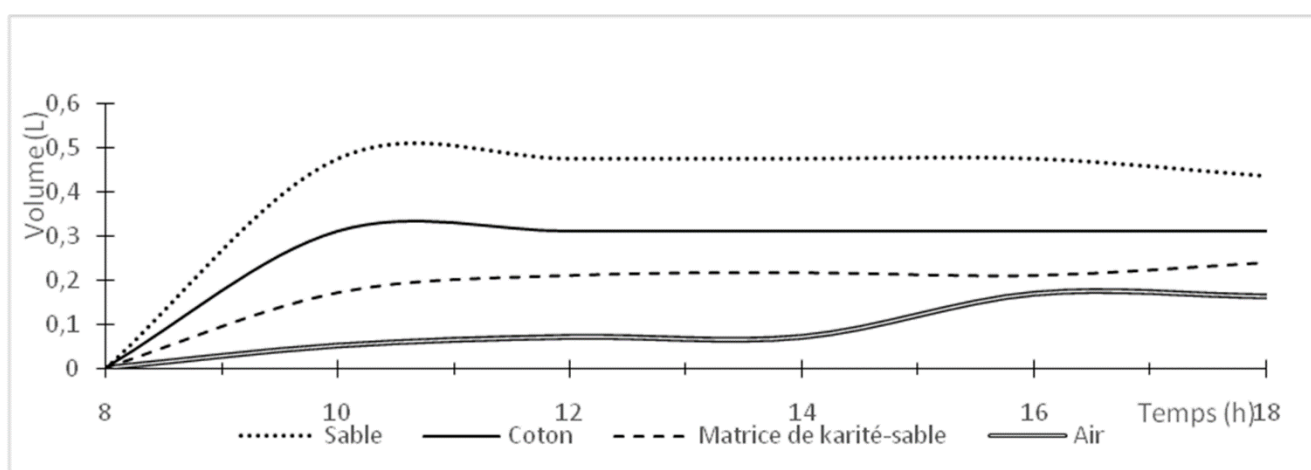


Fig. 12. Evolution journalière des pertes cumulées du 03/05/2020 (jour 3)

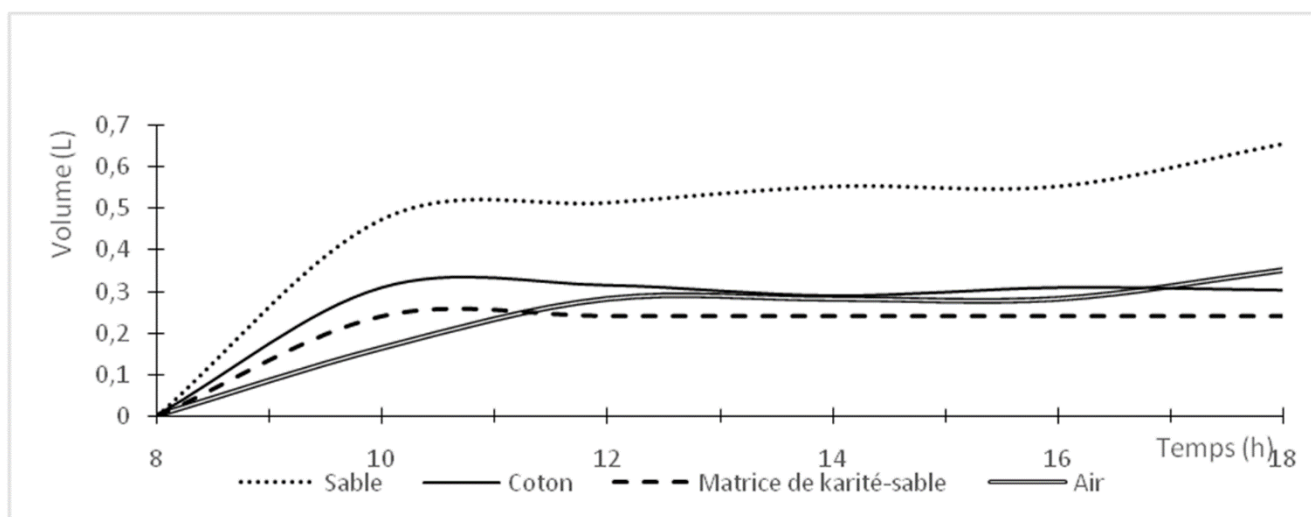


Fig. 13. Evolution journalière des pertes cumulées du 17/05/2020 (jour 17)

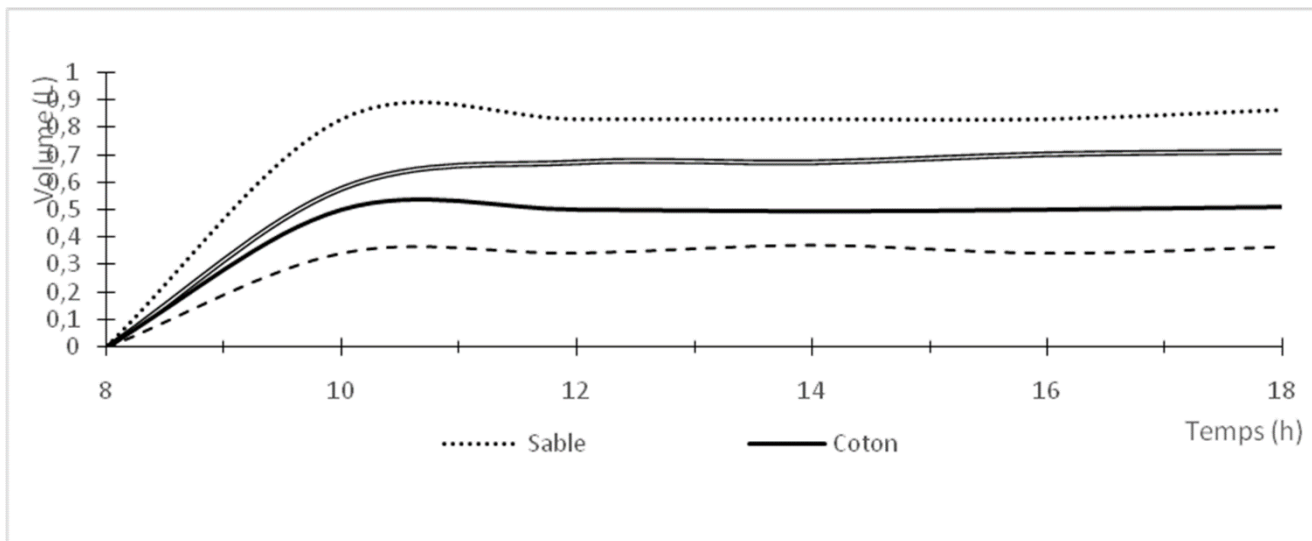


Fig. 14. Evolution journalière des pertes cumulées du 27/05/2020 (jour 27)

Les configurations des pertes sur ces jours sont diversifiées. En effet:

- Au jour 3, la courbe de sable est supérieure à toutes les autres devant la courbe de coton. La courbe de l'air est plus basse après la courbe de tourteau de karité;
- Au jour 17, la courbe de sable est supérieure à toutes les autres devant celle de coton. La courbe de tourteau de karité est plus basse après la courbe de l'air;
- Au jour 27, la courbe de sable est supérieure à toutes les autres devant celle de l'air. La courbe de tourteau de karité est plus basse après la courbe de coton.

Ces changements de comportement des courbes sont attribuables à la stabilisation sous l'effet de pression et de pesanteur qui peuvent engendrer des perturbations structurelles du stockage et de texture ou densité des matériaux, de sorte à influencer les vitesses d'évaporation [54].

L'évolution générale des pertes sur une durée de trente (30) jours (figure 15) a permis de mieux interpréter ces irrégularités observées.

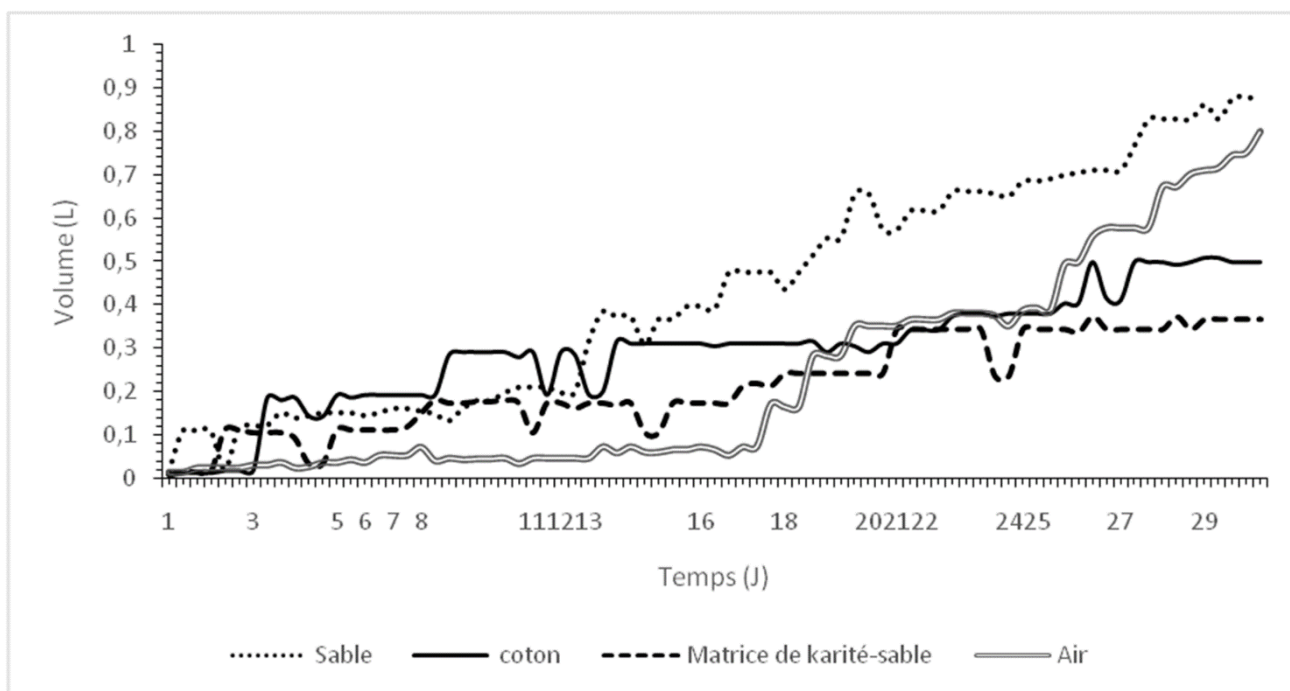


Fig. 15. Evolution comparée des différentes pertes par rapport à celles de l'Eco1-stoc, du 01 au 31/05/2020

La figure 15 montre l'évolution temporelle des pertes cumulées à l'Eco1-stoc (Tourteau de karité-sable) par rapport aux autres prototypes de stockage. Pendant les huit (8) premiers jours, la courbe relative à l'air est restée presque stagnante et plus basse par rapport aux autres qui amorçaient une croissance différenciée. C'est à partir de cet instant que la courbe à air a entamé brusquement une croissance parallèlement à celle du sable, sans la dépasser. La courbe relative à la matrice « sable-tourteau de karité » est restée régulièrement croissante et plus basse que celle du coton et toutes les autres courbes dans les vingt-deux (22) derniers jours. En effet, les pertes cumulées au niveau de la matrice tourteau-sable sont moindres comparativement à celles du coton et du sable. Cependant, au niveau de l'air, l'état des pertes qui était plus faible et stationnaire au départ, a connu une croissance brutale à partir de huitième jour de prélèvement, jusqu'à dominer les autres échantillons, sauf pour le sable. Quant à la courbe du sable, elle a connu également un saut au 12<sup>ème</sup> jour qui lui a permis de supplanter la courbe du coton qui évoluait constamment, au-dessus de celle du tourteau de Karité, aussi demeurée régulièrement plus basse. Ces différents changements d'allure s'expliquent par la stabilisation des systèmes sous l'influence du tassement du sable et d'humidification du coton, d'une part et de rupture de confinement de la fosse à air, d'autre part. Cela confirme la difficulté de la mise en œuvre de l'air, qui devrait être le meilleur matériau après le tourteau de karité, eu égard à sa faible conductivité thermique. La recherche d'une technologie efficace mais plus soutenable pour les opérateurs locaux serait plus que nécessaire.

### 3.1.8 BILAN RECAPITULATIF AVEC L'ECO1-STOC

Le tableau 7 récapitule les facteurs clés d'appréhension des acquis du système de stockage inventé.

**Tableau 7. Bilan évaluatif de l'Eco1-stoc du 01 au 30 mai 2018**

	Temp. moyenne carburant (°C)	Volume (litre)		Pertes par isolant			Plus-value (%)	Taux de non-évaporation (%)
		initial	final	Volume perdu (l)	taux (%)	Ratio (Ro)		
<b>Sable</b>	29,0	5,910897	5,032328	0,878569	14,86	1	-	85,14
<b>Air</b>	28,4	5,920798	5,120960	0,799838	13,51	0,91	0,15	86,49
<b>Eco1-stoc (tourteau de karité + Sable)</b>	34,0	5,883124	5,517154	0,365970	6,22	0,56	0,75	93,78
<b>Coton</b>	29,1	5,874660	5,377008	0,497652	8,47	0,57	0,73	91,53
<b>Température ambiante moyenne (°C)</b>	29							
<b>Pression atmosphérique moyenne (hPa)</b>	975,3							

Le tableau 7 établit le bilan des mesures et calcul des déterminants par modèle de stockage expérimental. La matrice « Tourteau de Karité-sable » a présenté un taux d'évaporation (6,22%) et un ratio de perte (0,42) les plus bas devant l'échantillon à coton. Le fluide contenu dans l'Eco1-stoc est plus chaud par rapport à celui des autres échantillons. En général, plus le carburant résiduel est froid, plus il s'est évaporé. Ceci s'explique par le fait que le système de stockage étant ouvert, il échange l'énergie et la matière avec l'extérieur pour rechercher l'équilibre thermodynamique [55]. En effet, selon le mécanisme de l'évaporation [55], les particules émergent en surface du carburant ont reçu une quantité d'énergie jusqu'à atteindre leur chaleur latente de vaporisation avant de se dissocier de leur chaîne moléculaire pour s'évaporer. Lors de ce processus, les particules d'hydrocarbure surchauffées et alevées emportent avec elles de l'énergie calorifique et cinétique qu'elles échangent avec l'atmosphère pour retrouver un autre équilibre thermodynamique, suite à plusieurs autres interactions chimiques et physiques, donnant l'ozone et pluies acides [56].

### 3.2 DISCUSSION

Parmi les matériaux isolants préconisés par la recherche bibliographique et des observations de terrain, le Tourteau de karité et le sable ont été retenus à la suite d'une sélection cohérente suivant la méthode de l'analyse multicritère de Thomas Saaty [52]. Ces matériaux locaux ont permis de construire le stockage intelligent, dénommé Eco1-stoc. L'évaluation de ce prototype de stockage a enregistré une plus-value de 0,98% par rapport au système de stockage conventionnel fait avec du sable, à l'image des stockages qui perdent en moyenne 1,7% de carburant à Korhogo. Cette plus-value, bien qu'économiquement insignifiante à court terme, a des avantages environnementaux, énergétiques et économiques énormes à long terme ou à grande échelle.

### 3.2.1 PERFORMANCE TECHNO-ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DU SYSTEME DE STOCKAGE INVENTE

Le tourteau de karité et l'air avaient présenté quelques difficultés opérationnelles. Ces deux matériaux ne peuvent être donc immédiatement conseillés aux opérateurs économiques, si et seulement les entraves circonstancielles qu'ils suscitent sont levées. Pour ce faire, il va s'agir d'une part, du développement de la culture de l'arbre karité qui contribuera également à la lutte contre la désertification et d'autres parts, de la maîtrise des technologies de confinement de l'air dans le sol.

### 3.2.2 SUR LE PLAN TECHNIQUE ET SCIENTIFIQUE

Les graphiques de la figure 8 sont des droites représentatives de l'évolution des volumes résiduels et dont les pentes respectives sont assimilées à la vitesse d'évaporation. Ils ont mis en évidence que l'évaporation en cuve enterrée, du supercarburant sans plomb au repos, est une fonction linéaire du temps si la température du fluide n'excédant pas 34 °C. Elles croissent inversement avec la résistance thermique du matériau encaissant. L'intérêt essentiel conséquent est que cette méthode permet d'estimer graphiquement la résistance ou la conductivité thermique d'un matériau par rapport à un autre, dont on connaît les caractéristiques thermiques.

Par ailleurs, le taux de non-évaporation de 93,78 % obtenu avec l'Eco1-stoc, est plus soutenable que le taux de récupération de vapeur de 80%, présenté par le système de récupération de vapeur (SRV) [15,16] qui ont été recommandés par la « directive européenne 94/63 du 20 décembre 1994 » et le « décret européenne du 18 avril 2001 » [2]. En dépit de son meilleur rendement, les SRV ont une technologie relativement plus complexe [57, 58] et peuvent être moins adaptés au climat chaud. En effet, le principe du système d'isolation thermique (SITH) adopte en amont, l'inhibition du processus d'évaporation d'hydrocarbures. Il réduit par anticipation le flux de chaleur incidente, facteur principal de l'évaporation [59, 60]. Cependant, les SRV et les clapets aux événements interviennent en aval, pour empêcher l'évasion de la vapeur déjà générée, dans la nature. Ils procèdent par la condensation, l'incinération ou recyclage du gaz d'hydrocarbures [61, 62]. Toute chose qui exprime la difficulté des SRV qui demandent assez d'énergie et de précautions à l'entretien [13].

La mise en rapport de ces deux principes permet de réaffirmer la priorisation de la prévention par rapport à l'intervention, que recommande toute méthode de gestion de risques [63]. Aussi, au cours de l'analyse des résultats intermédiaires, a-t-il été observé que:

- plus la capacité d'isolation du matériau encaissant est élevée, plus le carburant est mieux conservé et plus il est chaud;
- la vitesse d'évaporation étant liée aux propriétés thermiques du matériau encaissant, cette étude a permis de situer la conductivité thermique du tourteau de karité en dessous de celle du coton et au-dessus de celle de l'air ( $0,024 \leq \lambda_{\text{karité}} \leq 0,055$ ).

### 3.2.3 SUR LE PLAN ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL

Au sens des résultats expérimentaux obtenus avec l'Eco1-stoc, nous avons un ratio de pertes de 0,42. Cependant, selon les services des hydrocarbures de Korhogo ainsi que nos propres investigations de 2020, les pertes effectives sont évaluées à 1,7% sur les Stations-service à Korhogo. Par conséquent la réalisation de ce nouveau stockage produirait un taux de perte de 0,61%, qui est quatre fois plus faible qu'actuellement à Korhogo. En appliquant ce ratio expérimental sur cette donnée, les émissions de gaz d'hydrocarbures dans cette cité peuvent être réduites à 0,72%, soit une économie additionnelle induite de 0,98%. Ainsi, pour un stockage de super carburant de 10 000 litres à Korhogo, durant 30 jours, on aura pu sauver environ 98 litres sur les 170 litres qui auraient pu s'évaporer. On sait que le litre d'essence liquide donne mille litres (1000l) de vapeur du produit [64]. Le volume liquide de 170 l, d'une valeur marchande de 102 000 FCFA (Août 2019), lorsqu'il est évaporé, engendre environ 170000 litres de gaz toxique polluant et inflammable.

Il en résulte que la réduction des taux de pertes à 0,72% au stockage du carburant avec Eco1-stoc, va occasionner une embellie financière de 0,98% de revenu des distributeurs d'hydrocarbures et assurer une certaine économie d'énergie. De même, elle va empêcher des pluies acides ainsi que de l'ozone troposphérique qui accentuerait l'effet de serre et les impacts du dérèglement climatique [65]. Cependant, Il est nécessaire de faire remarquer que malgré la performance prouvée du système SRV [13], il est relativement plus onéreux. Pour un débit de carburant de 100 à 500 m<sup>3</sup>/an, le coût de revient par tonne de COV non émise est de 51 300 euros (33 575 136 F CFA), avec le procédé par condensation [13].

### 3.2.4 INFLUENCE DE LA GEOLOGIE DE L'ENCAISSANT SUR L'INTEGRITE DU SYSTEME DE STOCKAGE

Les résultats de l'étude ont révélé que dans les mêmes conditions d'enfouissement des échantillons, plus la conductivité thermique de l'isolant est faible, plus les pertes d'hydrocarbure enregistrées sont moindres au stockage. Ce résultat a été effectivement confirmé par plusieurs auteurs dont André Mermoud [75], qui a démontré que les propriétés thermiques, la

conductivité d'un corps, sont générées par sa composition chimique, sa porosité, son épaisseur et sa teneur en eau. Cela implique que l'échauffement ou la vitesse d'évaporation d'un fluide enterré est fonction de la profondeur d'enfouissement, du climat et des propriétés pédologiques et pétrographiques du sol. Ainsi, chaque élément chimique de l'encaissant imprime par sa nature et structure, une inertie thermique spécifique au matériau qu'il constitue [66] pour caractériser sa conductivité thermique [57]. C'est à ce titre que le tourteau de karité est plus isolant que le sable [58]. Un sol de type limon argilo-sableux est donc peu isolant qu'un sol sableux [58].

Outre l'énergie solaire, l'échauffement des sols provient d'une proportion non négligeable de l'énergie issue à 90% de la désintégration des éléments radioactifs des roches sous-jacentes [64]. Cette fraction d'énergie induit une radiation qui dépend de l'âge et de la composition chimique de la formation géologique [67]. Il s'en déduit que le granite transmet trois fois plus la chaleur que le basalte [67]. Au regard de cette interprétation, il revient que l'intensité de l'émission des gaz à effets de serre et des pertes énergétiques et économiques au stockage de produit pétrolier dépendent de la situation pédoclimatique du site d'enfouissement des réservoirs. Cela entraîne qu'il suffit de connaître la géologie et le climat d'un site, pour prévoir une perte minimale au stockage de l'hydrocarbure à y enfouir. Tout de même, une perte peut être atténuée en apportant du matériau isolant au système de stockage. Il devient donc impératif, à défaut d'un Eco1-stoc, de procéder à des prospections géologiques de tout site d'implantation du stockage des produits pétroliers.

#### **4 CONCLUSION**

L'étude de réduction de l'évaporation au stockage enterré du supercarburant sans plomb (SPb), réalisée à Korhogo (Côte d'Ivoire), avait visé l'atténuation des pertes et pollution consécutives à l'émission des vapeurs d'hydrocarbures dans l'atmosphère. Elle a procédé à la conception d'un système de stockage pouvant assurer le confort thermique au fluide volatil. Cette étude s'est appuyée sur les sciences et techniques géologiques, thermodynamiques et statistiques pour atteindre le résultat escompté. Ainsi, estimée initialement autour de 1,7 % sur terrain à Korhogo, avec du réservoir enfoui dans la cuirasse latérique ou dans une fosse maçonnée et couvert du sable, le système de stockage inventé promet un ratio de 0,42 de réduction de perte, soit une plus-value de 0,98%.

A cet effet, les différents travaux réalisés ont consisté à la recherche des matériaux locaux, relativement écologiques, aux propriétés thermiques adéquates afin de constituer les matières premières. Des essais d'évaporation ont été effectués sur quatre échantillons du supercarburant sans plomb, conditionnés et enterrés avec de différents et potentiels isolants thermiques. En résultats, divers taux de non-évaporation ont été relevés par matériau, à savoir: sable: 85,05 %; tourteau de karité: 90,81 %; air: 80,68 % et coton: 89,29 %.

A l'issue d'une autre analyse plus scientifique et circonstancielle, le couple « tourteau de karité-sable » a été choisi en vue de concevoir l'écosystème de stockage (Eco1-stoc) qui a réalisé un taux de non-évaporation avoisinant 93,78%. Par contre, en dépit de sa grande qualité d'isolation théorique, l'air a été défavorisé par une difficulté de mise en œuvre dans le sol de sorte que son confinement a été impossible pour garantir ses qualités thermiques. Le tourteau de Karité, a été choisi dans l'espoir de faire lever cette entrave dans le proche futur, avec la révolution de sa culture.

En somme, l'adoption de cette technologie marque une avancée majeure en thème de l'économie d'énergie, de développement de l'agriculture de karité, de la protection de l'environnement et de l'amélioration des revenus des distributeurs d'hydrocarbures. Néanmoins, des investigations doivent se poursuivre, s'étendre et viser des matériaux de récupération tels que la paille, les coques de coco et d'acajou, les sons du riz, les sciures de bois et les matériaux géologiques, notamment de l'argile et des perlites.

#### **REFERENCES**

- [1] G. Rotillon, 2007. La fiscalité environnementale outil de protection de l'environnement ? La Découverte | « Regards croisés sur l'économie » 2007/1 n° 1 | 108-113.  
<https://www.cairn.info/revue-regards-croises-sur-l-economie-2007-1-page-108.htm>.
- [2] L. Bensefa-Colas, F. Pineau, P. Hadengue, J.-P. Gennart, D. Choudat et F. Conso, 2009. Exposition professionnelle au benzène dans le circuit de distribution des carburants et conséquences pour la surveillance médicale des employés, 143.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.admp.2009.02.012>.
- [3] A. Cicoella, 2008. Les composés organiques volatils (COV): définition, classification et propriétés, 160-162. Doi: 10.1019/200720223.
- [4] Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2015. Code de recommandations techniques pour la protection de l'environnement applicable aux systèmes de stockage hors sol et souterrains de produits pétroliers et de produits apparentés (PN 1327).CAN/ULC-S655-15,1-52.

- [5] M. Meybeck, J-P. Massa, V. Simon, E. Grasset et L. Torres, 2000. Etude de la distribution atmosphérique de composés organiques volatils aromatiques: benzène, toluène, xylènes (BTX) et du dioxyde d'azote sur l'agglomération toulousaine *Pollution Atmosphérique* n° 168, 569-582.
- [6] N. Mhiri, 2009. Étude d'un procédé propre couplant l'absorption gaz/liquide microstructurée avec la distillation pour le traitement d'air chargé par un Composé Organique Volatil, 7-8.  
[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php).  
<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>.
- [7] M.-S Tiebre, 2019. Dynamique de l'occupation du sol de la « zone dense » de Korhogo de 2000 à 2015 (nord de la cote d'ivoire), 3-27. ISSN 2521-2125 <https://www.researchgate.net/publication/340279918>.
- [8] Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec, 2015. Hydrocarbures pétroliers: caractéristiques, devenir et criminalistique environnementale – Études GENV222 et GENV23, Évaluation environnementale stratégique globale sur les hydrocarbures. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 41 p et annexes, 8. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2015 ISBN © Gouvernement du Québec, 2015.
- [9] F-X. Merlin, 2008. Essence sans plomb, 6-56. N° CAS: 86290-81-5.  
<https://www.cedre.fr/content/download/2751/29097/file/Extrait-essence.pdf>.
- [10] United States Environmental Protection Agency, 2006. Control of Hazardous Air Pollutants from Mobile Sources, Federal Register, vol. 71, no 60.  
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1004LNN.PDF?DockKey=P1004LNN.PDF>.
- [11] Statistique Canada, 2012. Les pertes d'essence par évaporation des postes d'essence canadiens, 4-25. N°16-001-M au catalogue, n°15, ISSN 1917-9707/ ISBN 978-1-100-98234-2.
- [12] A. Baudic, 2017. Caractérisation expérimentale et statistique des sources de Composés Organiques Volatils (COV) en région Île-de-France, 31-92. HAL Id: tel-01546311, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01546311>.
- [13] Directive EHS Générale, 2007. Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires pour les terminaux pétroliers de pétrole brut et de produits pétroliers, 1-15.  
[https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/4972961e-8919-4d71a6e3cbd1e30fc862/002\\_Crude%2BOil%2Band%2BPetroleum%2BProduct%2BTerminals.pdf?MOD=AJPERES&CVID=jqevCsA&ContentCache=NONE&CACHE=NONE](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/4972961e-8919-4d71a6e3cbd1e30fc862/002_Crude%2BOil%2Band%2BPetroleum%2BProduct%2BTerminals.pdf?MOD=AJPERES&CVID=jqevCsA&ContentCache=NONE&CACHE=NONE).
- [14] S. Forestier, 2012. Etude d'évaporation d'un liquide répandu au sol suite à la rupture d'un stockage industriel, page. HAL Id: tel-00718229 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00718229>.
- [15] J. Triollet et B. Salle, 2009. Évaluation de la vitesse d'évaporation et de la concentration d'un composé organique volatil dans l'atmosphère d'un local de travail. 4-5, ED 6058.
- [16] A. Germain, J. Rousseau et T. Dann, 2005. Problématique du benzène dans l'est de Montréal (Québec), Canada. *Pollution Atmosphérique* N° 185, 91-100. DOI: 10.4267/pollution-atmospherique.1556.
- [17] AUCHAN Carburant / Centre commercial Aushopping Grand-Plaisir (78), 2017. Dossier d'enregistrement pour une station-service au titre de la rubrique 1435 de la nomenclature des installations classées, Annexe 8 Article 2/2.1.63.1. 1242015-V03.
- [18] D. Sylla et C. Hauhouot, 2016. Dynamique de l'occupation du sol dans la zone dense de Korhogo à partir d'une approche « pixel par pixel » appliquée à des images Landsat TM/ETM+. *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, n°2, 31-39. [http://www.revues-ufhb-ci.org/fichiers/FICHIR\\_ARTICLE\\_2155.pdf](http://www.revues-ufhb-ci.org/fichiers/FICHIR_ARTICLE_2155.pdf).
- [19] A. L. Kouakou, 1995. Les haies-vives traditionnelles et modernes en pays senoufo, 13-14.  
[Agritrop.cirad.fr/563530/1/document-563530-pdf](http://agritrop.cirad.fr/563530/1/document-563530-pdf).
- [20] G. P. Williams et L. W. Gold, Février 1977. Les températures du sol, 3.
- [21] A. Kaemmerlen, 2009. Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du bâtiment. *Articles L 122. 4/articles L 335.2-L 335.1*  
[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)  
<http://www.culture.gouv.fr/culture/infospratiques/droits/protection.htm>.
- [22] S. Haffen, 2012. Caractéristiques géothermiques du réservoir gréseux du Buntsandstein d'Alsace, 13-14. HAL Id: tel-00780947 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00780947>.
- [23] R. Escadafal, 1988. Contribution à la cartographie des états de surface d'un bassin versant sahélien et au suivi de leur évolution: recouvrement de la végétation et phytomasse herbacée, 19-41.  
<https://www.researchgate.net/publication/29612920>.
- [24] N. Bouacha et L. Zeghradnia, 2015. L'isolation dans les projets de bâtiments entre le choix et l'exigence, 599-601.  
<https://www.researchgate.net/publication/322555932>.
- [25] E. Le Gentil, 2009. Pollution par les hydrocarbures en Manche et golfe de Gascogne. Risques et prévention entre 1960 et 2004, 26-28. HAL Id: tel-00435266, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00435266>.

- [26] S. Colomano, A. Saada, E. Victoire, V. Guerin, C. Zoring, L. Amalric, M. Blessing, D. Widory, D. Hube et C. Blanc, 2014. Nature des produits pétroliers et origine du vieillissement: tentative de l'identification de la source via la prise en compte des impacts et l'analyse de l'âge approximatif des déversements, 32. BRGM/RP-64174-FR.
- [27] F. Mnasri, 2016. Étude du transfert de chaleur et de masse dans les milieux complexes: application aux milieux fibreux et à l'isolation des bâtiments, 51-52. HAL Id: tel-01508859 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01508859>.
- [28] R. Akkouche, 2017. Corrosion des aciers dans les sols: mécanismes et cinétiques associés aux périodes transitoires d'humidification-séchage, 5, 30-34, 87-99. HAL Id: tel-01804979 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01804979>.
- [29] F. Majid, M. Lahlou, M. El Ghorbaet A. Hachim, 2015. Réservoirs de stockage: Méthodologie de calcul et analyse sécuritaire, 2. <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/57477/68817.pdf?sequence=1>.
- [30] G. V. Durme et M. Erpicum, 2005. Variabilité spatio-temporelle de l'albédo Analyse menée à la résolution métrique, 28. <https://www.researchgate.net/publication/239549299>.
- [31] M. Aboe, 2012. Etude de la variabilité intra-balle des caractéristiques technologiques des fibres de coton produites en Afrique de l'Ouest et du Centre, 29. HAL Id: tel-00718836 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00718836>.
- [32] M. Chikhi, 2013. Métrologie et modélisation des transferts dans les composites naturels à faible cout pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires, 131.
- [33] G. Hammond et C. Jones, 2008. Inventory of carbon and energy (ICE), 12. <http://www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied/>.
- [34] M. Edwards, 2018. Cotton Outlook, 7.
- [35] Fonds Interprofessionnel pour la Recherche et le Conseil Agricole, 2018. Rapport Annuel 2018, 11. <https://firca.ci/wp-content/uploads/2019/11/RAPPORT-FIRCA2018.pdf>.
- [36] O. Dubut, 2012. Les beurres: karité (*Butyrospermumparkii*), cacao (*Theobroma cacao*), kokum (*Garcinaindica*) et illité (*Shoreastenoptera*), 27.
- [37] E. S. Noumi, M-H. Dabat et J. Blin, 2012. Développement durable de la transformation traditionnelle du karité en valorisant énergétiquement les résidus organiques, 243. <https://www.researchgate.net/publication/270566973>.
- [38] A. J. P Attikora, 2018. Amélioration génétique du karité (*Vitellariaparadoxa* C.F. Gaertn) en Côte d'Ivoire: Analyse de la diversité morphologique des arbres élites identifiés dans les régions de la Bagoué et du Tchologo, 5. <http://hdl.handle.net/2268.2/6056>.
- [39] J. Bouaziz, B. Elleuch et R. El Gharbi, 1993. Synthèse et caractérisation de gels en silice obtenus à partir du sable tunisien, 412.
- [40] B. Traoré, 2018. Elaboration et caractérisation d'une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés): Amélioration de la résistance par des charges en argiles, 24-26. HAL Id: tel-02088767 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02088767>.
- [41] C. M. Ekengoue, R. F. Lele et A. K. Dongmo, 2018. Influence de l'exploitation artisanale du sable sur la santé et la sécurité des artisans et l'environnement: cas de la carrière de nkol'ossananga, région du centre Cameroun, 247. Doi: 10.19044/esj.2018.v14n15p246 URL: <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n15p246>.
- [42] O. Toumba et A. Wakponou, 2014. Exploitation minière dans l'arrondissement de Figuil (Cameroun): problèmes de santé publique et effets environnementaux/Mining exploitation in the Figuil subdivision (Cameroon): public healthproblems and environmental impacts, 6. DOI: 10.4000/belgeo.14853/ISSN: 2294-9135 <http://journals.openedition.org/belgeo/14853>.
- [43] B. Traore, 2018. Elaboration et caractérisation d'une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés): Amélioration de la résistance par des charges en argiles, 24-26. HAL Id: tel-02088767 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02088767>.
- [44] E. Hache, 2014. Apport de la bande de Chappuis pour la mesure de l'ozone depuis un satellite géostationnaire pour la surveillance de la qualité de l'air, 30.
- [45] B. Mohamed, 2017. Effet des précipitations sur la distribution du Zn et du Pb issus de retombées atmosphériques dans le sol: Cas de la fonderie de Tiaret (ALFET), 57.
- [46] L. Zerbo, B. Sorgho, S. Kam, J. Soro, Y. Millogo, B. Guel, K. Traoré, M. Gomina et P. Blanchart, 2012. Comportement thermique de céramiques à base d'argiles naturelles du Burkina Faso, 54. ISSN 0796-6687 <https://www.researchgate.net/publication/273181312>.
- [47] S. Simporte, 2018. Modélisation, simulation et optimisation d'un système de stockage à air comprimé couplé à un bâtiment et à une production photovoltaïque, 28-30. HAL Id: tel-02059339 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02059339>.
- [48] G. Horga, 2013. Contribution théorique et expérimentales concernant l'utilisation des matériaux textiles dans l'isolation thermique des conduites qui transportent de l'eau chaude, 10. <http://theses.fr/2013ARTO0205>.
- [49] T. A. S. R. N'krumah, 2014. Variabilité climatique et incidence de la méningite cérébro spinale dans le district sanitaire de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire), 145. Environnement, Risques & Santé, 2014, Volume 13, Numéro 2. [http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/sante\\_pub/ers/sommaire.md?type=text.html](http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/sante_pub/ers/sommaire.md?type=text.html).



- [50] A. N. Boko-Koiadia, G. Cissé, B. Koné et D. Séri, 2016. Variabilité climatique et changements dans l'environnement à Korhogo en Côte D'ivoire: Mythes Ou Réalité ? 161. European Scientific Journal February 2016 edition vol.12, No.5 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431  
Doi: 10.19044/esj.2016.v12n5p158  
URL: <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n5p158>.
- [51] ASTM 54B-Volume-Correction-to-15-C.  
<https://fr.scribd.com/document/366788409/ASTM-54B-Volume-Correction-to-15-C-pdf>.
- [52] J. B. A. Rakoto, 2015. Analyse comparative de méthodes multicritères d'aide à la décision pour le secteur financier, 1-50. Rapport de recherche IRIT n° IRIT/RR—2015—07--FR.
- [53] M. F. Fingas, 2012. Studies on the Evaporation Regulation Mechanisms of Crude Oil and Petroleum Products, 253-255.  
<http://dx.doi.org/10.4236/aces.2012.22029><http://www.SciRP.org/journal/aces>.
- [54] N. Borgetto, 2011. Étude expérimentale du comportement et de l'évaporation d'un film liquide combustible en présence d'une flamme, 11-13, 22. HAL Id: tel-00690528  
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00690528>.
- [55] N. Vernier et C. Even-Beaudoin, 2020. Thermodynamique. Dunod, ISBN 978-2-10-080290-6.  
[https://www.dunod.com/sites/default/files/atoms/files/Feuilletage\\_580.pdf](https://www.dunod.com/sites/default/files/atoms/files/Feuilletage_580.pdf).
- [56] R. Hariti, A. Benbrik, D. Lemonnier Et Khaled Khaldi, 2007. Etude du phénomène d'évaporation de GNL dans les bacs de stockage aérien, 1-6. HAL Id: hal-00162853 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00162853>.
- [57] P. Reiffsteck, M. Couaillier et G. Grandjean, 2014. Validation d'un système de classification thermique des sols. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014 – Beauvais 8-10 juillet 2014  
<https://www.cfmr-roches.org/sites/default/files/jngg/112.pdf>.
- [58] M. Benhammou et B. Draoui, 2011. Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar - Effet de la nature du sol, 221-225.  
<http://193.194.91.150:8080/en/article/120143>.
- [59] Q. Mouret, 2018. Etude expérimentale des mécanismes d'évaporation d'un film liquide combustible et de la stratification induite, 25-26, 86-87. HAL Id: tel-01817431  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01817431v2>.
- [60] M. Roche, 1963. Hydrologie de surface, 107-111. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:02081>.
- [61] L. Dupont, J. Chaineaux, L. Perrette, G. Marlair et X. Lefebvre, 2008. EAT-DGE-16-Aide à l'intervention des inspecteurs des installations classées dans les établissements où des atmosphères explosives peuvent se présenter « Arrête-flamme dans les stations-service distribuant du Superéthanol », 16, 24. MEDAD Réf: DCE-08-85793-02387A.
- [62] Office Fédéral de l'Environnement, 2021. Contrôle des stations-service équipées d'un système de récupération des vapeurs. Aide à l'exécution pour les stations-service. 1re édition actualisée 2021, 7-19.  
[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/luft/uv-umwelt/vollzug/handbuch\\_fuer\\_diekontrollevontankstellenmitgasrueckfuehrunganlei.pdf.download.pdf/manual\\_pour\\_le\\_contr\\_olesdesstations-serviceequipeesdunsystemedere.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/luft/uv-umwelt/vollzug/handbuch_fuer_diekontrollevontankstellenmitgasrueckfuehrunganlei.pdf.download.pdf/manual_pour_le_contr_olesdesstations-serviceequipeesdunsystemedere.pdf).
- [63] M. Balavoine et B. Kieffer, 2019. Vers un autre système de santé, 10-14.  
DOI: <https://doi.org/10.4414/bms.2019.18179>.
- [64] P. Maesen, 2018. Note méthodologique de calcul des émissions de gaz à effet de serre du groupe VIVENDI, 1-10. Edition 01 – Février 2018.  
[https://www.vivendi.com/wpcontent/uploads/2018/03/20180319\\_VIV\\_RSE\\_Note\\_methodologique\\_de\\_calcul\\_des\\_em\\_issions\\_de\\_GES\\_Vivendi\\_edition\\_01\\_02\\_2018.pdf](https://www.vivendi.com/wpcontent/uploads/2018/03/20180319_VIV_RSE_Note_methodologique_de_calcul_des_em_issions_de_GES_Vivendi_edition_01_02_2018.pdf).
- [65] B. Aumont et M. Camredon, 2005. Production d'ozone troposphérique et régimes chimiques, 1-7. DOI: 10.4267/pollution-atmospherique.1404.
- [66] S. Mohaine, 2018. Etude des propriétés thermiques et mécaniques des bétons isolants structurels incorporant des cénoosphères, 26-49,170. HAL Id: tel-02097989 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02097989>.
- [67] S. Haffen, 2012. Caractéristiques géothermiques du réservoir gréseux du Buntsandstein d'Alsace, 13. HAL Id: tel-00780947  
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00780947>.