

# Production d'eau dans un ancien sarcophage à Arles - sur - Tech (France)

D. Beysens<sup>1,2</sup>, M. Muselli<sup>3</sup>, J.-P. Ferrari<sup>4</sup>, A. Junca<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), Equipe du Supercritique pour l'Environnement, les Matériaux et l'Espace (ESEME), ICMCB, Avenue du Dr. A. Schweitzer, 33608 Pessac, France

<sup>2</sup> Organisation Pour l'Utilisation de la Rosée (OPUR), 26, rue des Poissonniers, 33600 Pessac, France

<sup>3</sup> Université de Corse, Centre de recherches Energie et Système, Route des Sanguinaires, 20000 Ajaccio, France

<sup>4</sup> "Le Cloître", 66150 Arles-sur-Tech, France

## Article original en anglais :

D. Beysens, M. Muselli, J.-P. Ferrari, A. Junca, Water production in an ancient sarcophagus at Arles-sur-Tech (France), *Atmospheric Research*, 57 (2001), 201-212,

Traduit en français par A. Junca

## Résumé :

Depuis le 16<sup>ème</sup> siècle, au moins, un sarcophage scellé, situé dans la cour de l'abbaye d'Arles-sur-Tech (France), est réputé produire des centaines de litres d'eau par an. Beaucoup d'hypothèses ont été avancées pour expliquer ce mystère. Après avoir recueilli pendant environ trois ans des données, nous concluons que cette quantité d'environ 200 litres d'eau par an, est le bilan final d'une entrée d'eau de pluie, de rosée condensée et d'évaporation. Des défauts dans la jonction du couvercle et du corps du sarcophage permettent un échange avec l'atmosphère. La condensation est six fois plus importante que l'évaporation et participe à la "production" d'eau totale à hauteur de 10 %.

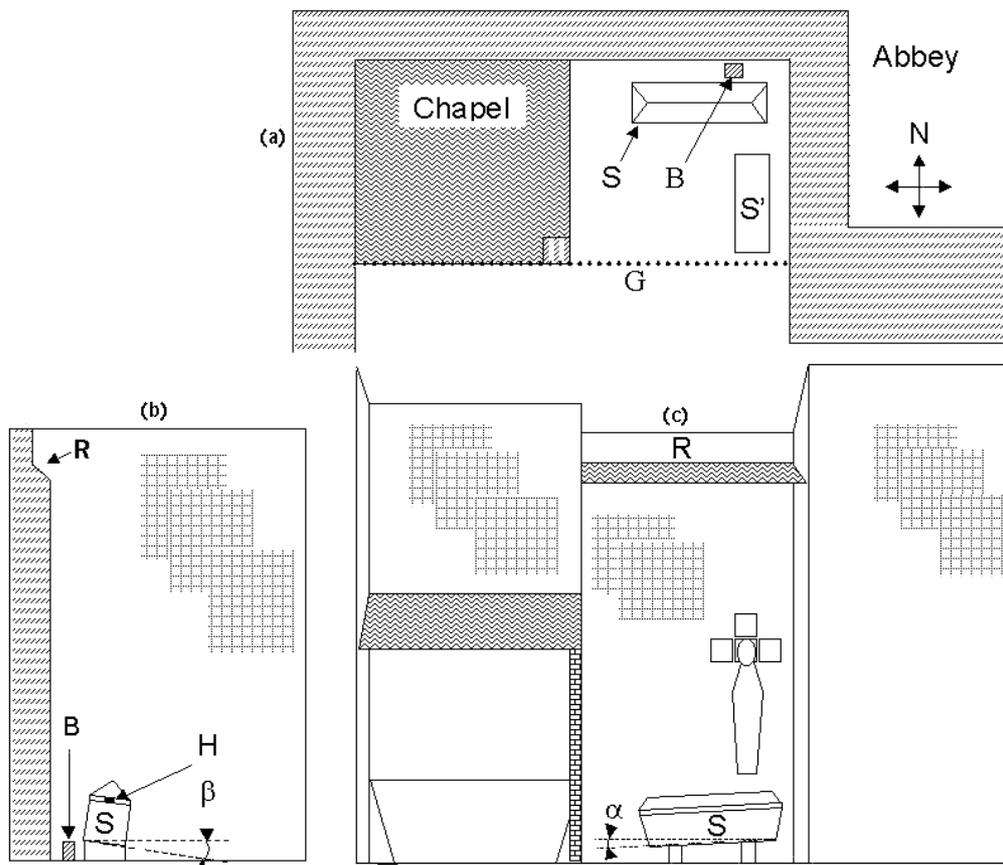
## Mots-clés:

Production d'eau, condensation de rosée, évaporation, eau de pluie.

## 1. Introduction

Les condenseurs de rosée artificiels tels que ceux de Feodosia (Crimée, Ukraine) ou de Trans-en-Provence (France), sont très rares (cf. Nikolayev et al., 1996). Il est notoire qu'un phénomène curieux apparaît à Arles-sur-Tech (France), qui pourrait être au moins partiellement expliqué par une condensation de rosée.

L'abbaye d'Arles est connue pour être le siège d'un phénomène étrange qui intervient depuis le 16<sup>ième</sup> siècle (et probablement plus tôt, à la fin du 12<sup>ième</sup> siècle<sup>1</sup>), quand un sarcophage de marbre réputé avoir contenu les restes des Saints Abdon et Sennen, fut placé dans la cour extérieure de l'abbaye à 40 cm de murs hauts et massifs. Ce sarcophage (appelé la "Sainte Tombe" par les habitants et les pèlerins) se remplit d'eau bien qu'il soit fermé d'un couvercle et nettement séparé des murs comme du sol (Fig. 1). L'eau est puisée à travers une fente entre le couvercle et le corps du sarcophage, dans le passé, grâce à un ruban se gorgeant d'eau comme une éponge, et, depuis 1859, avec un siphon de cuivre introduit dans la fente. La quantité d'eau n'a jamais été précisément mesurée mais elle est estimée de 100 à 800 l par an (Fitzherbert, 1989; Vallespir, 1972).



**Fig. 1 :** Vue schématique de l'implantation du sarcophage. (a) vue de dessus ; (b) vue latérale ; (c) vue de face ; (R) corniche du toit ; (H) trou de puisage de l'eau ; (B) appareil d'enregistrement des données ; (S) sarcophage ; (S') autre sarcophage sans couvercle ; (G) grille ;  $\alpha = 2,7^\circ \pm 0,5^\circ$  ;  $\beta = 4,3^\circ \pm 0,5^\circ$ .

Le sarcophage est en marbre blanc et ses dimensions intérieures sont les suivantes : longueur  $L=1,76$  m ; largeur  $l = 0,47$  m ; hauteur  $h = 0,40$  m. La pierre a environ 8 à 10 cm d'épaisseur et la hauteur maximale du couvercle est de 31cm. Le dessous du sarcophage est, en moyenne, à 23 cm du sol. Les côtés du sarcophage sont à 42 cm du mur nord et à 40 cm du mur est. Le sarcophage est implanté par  $2^\circ 38' 13''$  de longitude est et  $42^\circ 28' 40''$  de latitude nord, à 275 mètres d'altitude.

<sup>1</sup> Guillaume de Gaucelme, Seigneur de Taillet, qui mourut en 1204, est réputé avoir été guéri d'un cancer de la face grâce à l'application d'eau du sarcophage. Le rapport écrit le plus ancien ayant trait à la production d'eau est daté de 1591 et a été rédigé par Miguel Llot, un moine Dominicain de Clair.

Perard et Leborgne entreprirent la seule étude réellement scientifique de ce phénomène (Pérard et Leborgne, 1961). Après deux mois sans pluie, ils rapportent en Avril 1961, 14 jours de données faisant la corrélation entre le niveau de l'eau dans le sarcophage et les chutes de pluie. Ils conclurent, après avoir mené des expériences sur le couvercle de marbre, que ce dernier était probablement poreux, supposant une migration de l'eau en 5 jours à travers le couvercle. Nous verrons dans la suite que cette assertion n'est pas fondée.

Toutefois, d'après nos propres discussions avec les représentants de la paroisse responsables du puisage de l'eau, il appert que le niveau de l'eau ne suit pas apparemment les chutes de pluie: en saison sèche, de l'eau est recueillie, et une chute de pluie n'augmente pas inévitablement le niveau d'eau. Des phénomènes de condensation (et d'évaporation) doivent donc y avoir leur place. Le site est particulièrement favorable à la condensation: l'humidité est élevée du fait de la proximité de la mer, la cour de l'église est en permanence à l'ombre de murs élevés, par endroits le couvercle s'élève de 1 à 5 mm au-dessus du corps du sarcophage ce qui permet circulation d'air et convection. La pluie pénètre aussi probablement par les interstices couvercle/sarcophage puisque ce dernier est incliné de façon à concentrer l'eau vers la zone de puisage; de plus, une petite corniche concentre l'eau de pluie au voisinage immédiat du sarcophage (Fig. 1). Il est de fait que nous avons observé par pluie fine des gouttes d'eau pendant du couvercle dans l'interstice couvercle/corps. Des gouttes peuvent ainsi s'écouler à l'intérieur du sarcophage.

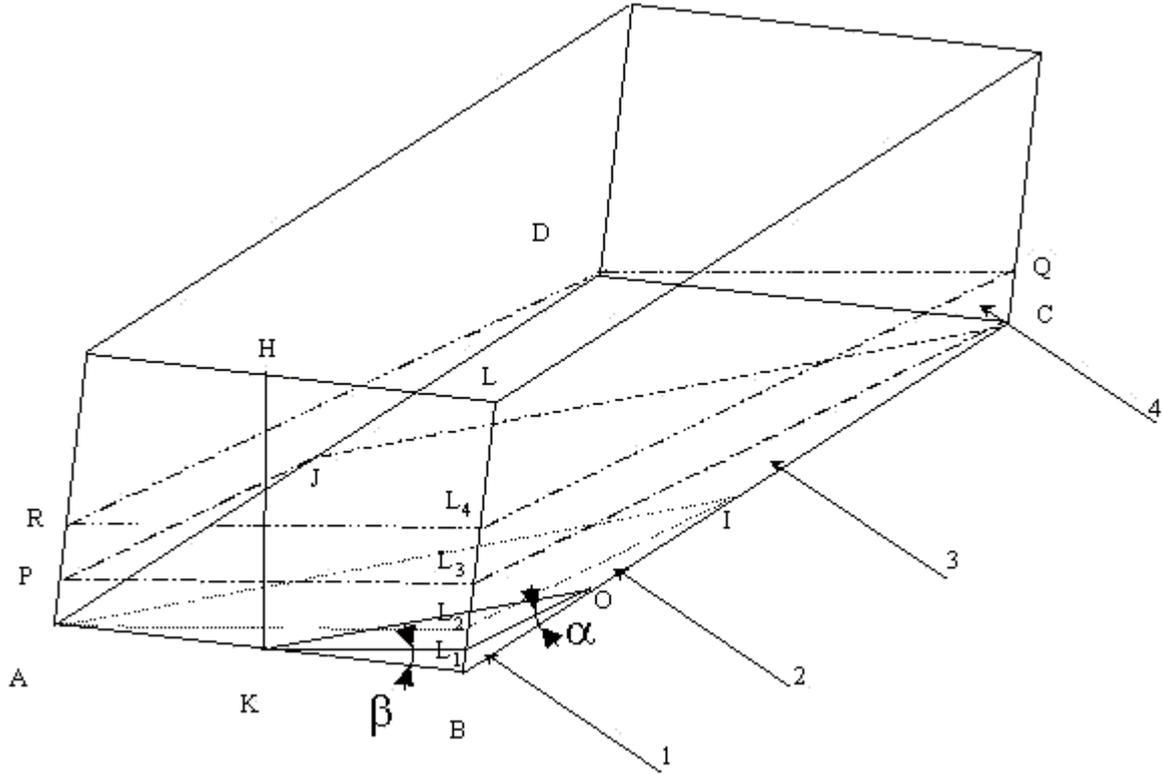
Afin de déterminer si la tombe est un condenseur de rosée "naturel", nous avons donc mesuré sur une longue période de temps (presque trois ans) la contribution relative à la production d'eau de la pluie, de la rosée et de l'évaporation. L'étude commença le 31 Mai 1997 et se termina le 26 Avril 2000. Cette étude fut menée en étroite collaboration avec la paroisse. Elle n'a nécessité qu'une instrumentation très légère par respect pour la Sainte Tombe et les convictions des pèlerins venus visiter et honorer le site.

## 2. Expérimentation

Afin de mener à bien les mesures sur la tombe de la manière la moins importune nous mîmes en place un réseau de 4 thermocouples. Ils mesurèrent les températures suivantes: (1) air extérieur, (2) eau dans le sarcophage, (3) la pierre à l'extérieur du sarcophage, et (4) la pierre à l'intérieur du sarcophage du 31/05/1997 au 24/01/1998 et (4') l'air intérieur du sarcophage après cette date.

Les capteurs étaient reliés à une petite centrale électronique de mesure, approvisionnée en énergie par des piles, le tout situé dans un petit coffret étanche derrière la tombe, et invisible de l'extérieur. Nous avons aussi utilisé un thermomètre - hygromètre électronique enregistreur inclus dans le coffret de l'enregistreur de températures jusqu'à Janvier 1998. A cause de l'effet "lissant" de la boîte, l'hygromètre fut transporté après le 24/01/1998, à quelques mètres du sarcophage, dans une petite chapelle ouverte dans deux directions orthogonales. Nous avons aussi testé l'humidité relative à l'intérieur du sarcophage. Comme prévu, quand il y avait de l'eau dans la cuve, l'humidité relative était presque 100 %.

La chute de la pluie était mesurée à environ 200 m au Nord-Est du sarcophage dans une petite station météo (1), utilisant un pluviomètre - entonnoir classique de 360 mm de haut et 116 mm de diamètre, relevé tous les jours. La température de l'air, l'humidité relative de l'air (mesurée par un hygromètre à "cheveu" ), et la pression atmosphérique étaient enregistrés sur des tambours mécaniques relevés une fois par semaine, à 250 m au Nord-Est du sarcophage.



**Fig. 2 :** Les différentes zones de remplissage (1,2,3,4) (voir texte). Ici  $h$  est mesuré le long de KH,  $h_0 = BL_1$ ,  $h^*$  est la hauteur de l'eau le long de BL. Les différentes zones correspondent aux volumes suivants : (1) KBOL<sub>1</sub> ; (2) ABIL<sub>2</sub> ; (3) ABCJPL<sub>3</sub> ; (4) ABCDRL<sub>4</sub>Q.

Seule une personne est autorisée par la paroisse à puiser l'eau. Cette personne mesurait la quantité d'eau enlevée, et enregistrerait le niveau d'eau dans la cuve avant et après le puisage grâce à un chiffon attaché au siphon. La quantité d'eau est donnée par les formules suivantes où  $L = 176$  cm,  $l = 47$  cm et les angles d'inclinaison  $\alpha = 2,7^\circ \pm 0,5^\circ$  et  $\beta = 4,3^\circ \pm 0,5^\circ$  (voir Fig.1).

Du fait de l'existence de deux angles d'inclinaison, la relation entre le niveau de l'eau dans le sarcophage et le volume de l'eau contenue est complexe. La Fig. 2 montre que quatre domaines de variation peuvent être déterminés selon les valeurs de  $h = KH$ , le niveau mesuré à l'endroit du puisage. Il est plus simple d'exprimer le volume d'eau (noté  $V^*$ ) en fonction de  $h^* = BL_i$ , le niveau d'eau le long de BL. Ici  $i$  varie de 1 à 4 suivant chacun des quatre domaines définis plus haut. A partir de considérations géométriques simples, l'on obtient:

$$1^{\text{er}} \text{ cas : } \quad h^* < l\beta, \quad V^* = \frac{h^{*3}}{6\alpha\beta} \quad (1)$$

$$2^{\text{ème}} \text{ cas : } \quad l\beta < h^* < L\alpha \quad V^* = \frac{l(6h^{*2} - 6h^*l\beta + 2l^2\beta^2)}{12\alpha} \quad (2)$$

$$3^{\text{ème}} \text{ cas : } \quad L\alpha < h^* < l\beta + L\alpha \quad V^* = \frac{1}{6\alpha} \left( \frac{(-h^* + L\alpha)^3}{\beta} + l(3h^{*2} - 3h^*l\beta + l^2\beta^2) \right) \quad (3)$$

$$4^{\text{ème}} \text{ cas : } \quad (l\beta + L\alpha) < h \quad V^* = \frac{1}{2}lL(2h^* - L\alpha - l\beta) \quad (4)$$

La relation entre  $h^*$  et  $h$  est la suivante:

$$h^* = \frac{h}{\cos \alpha} + h_0 \approx h + h_0 \quad (5)$$

où :

$$h_0 = BL_1 = l\beta/2 \quad (6)$$

Quand  $h = 0$ , de l'eau peut être présente dans le sarcophage quoique non détectable par le siphon à l'endroit du puisage, conduisant à un volume mort maximum (domaine 1) de:

$$V_0 = \frac{l^3 \beta^2}{48\alpha}$$

$$(= 0.26 \text{ l}). \quad (7)$$

En 1950, le sarcophage fut ouvert 155 ans après avoir été fermé (Fitzherbet, 1989; Vallespir, 1972), et l'on trouva au fond une couche de quelques cm de boue sèche, excepté dans le voisinage immédiat de l'endroit du siphonnage où la pierre était visible. Il fut rouvert récemment (21 Septembre 2000). L'eau avait été complètement retirée par le siphon avant l'ouverture, correspondant par conséquent au niveau  $h = 0$ . On trouva que le fond du sarcophage n'était pas plat, avec une dépression à environ un tiers de la longueur de la cuve à partir de l'endroit du siphonnage. Cette dépression était remplie d'eau et de boue. Après avoir filtré le contenu, l'on mesura 2,5 l d'eau, correspondant au volume "mort" réel  $V_0^* = 2,51$ . Nous déduisons par conséquent simplement le volume  $V$  de  $V^*$  par :

$$V = V^* - V_0^* \quad (8)$$

Les mesures de Perard et Leborgne ont été obtenues en Avril 1961, durant une courte période après le nettoyage du sarcophage. Les auteurs n'ont pas eu conscience de l'existence du volume mort  $V_0$ . Ce volume explique, à notre sens, les 5 jours de délai des mesures de Perard et Leborgne ce qui est une raison bien plus plausible que la porosité du couvercle et la non-porosité de la cuve qu'ils invoquaient. (Nous pensons que le marbre peut être poreux sur quelques mm d'épaisseur du fait de l'inévitable usure du temps, mais certainement pas "à cœur").

Afin de déterminer le débit d'eau produit, nous avons dû adapter notre analyse au rythme du puisage, c'est à dire à la période de temps entre deux collectes d'eau. Cette période est de l'ordre d'une à trois semaines. Les données relatives à l'humidité et aux températures à l'intérieur de la tombe étaient relevées toutes les deux semaines et elles s'enregistraient avec une périodicité de trois heures. (Nous avons malheureusement souffert de quelques pannes sur l'hygromètre et/ou le thermomètre au sarcophage ou à la station). Les mesures de température sont à  $\pm 0,2$  K près à la tombe et  $\pm 0,5$  K à la station. Les mesures d'humidité sont à 5% près. Les différents capteurs d'humidité ont subi une contre-vérification qui amène à la conclusion que la détermination des températures de rosée est dans une fourchette de  $\pm 0,5$  K et affiche une dérive positive de 2 K environ. Comme la quantité d'eau contenue dans l'air ne varie pas de façon appréciable sur les 250 m séparant le sarcophage de la station de mesure nous avons seulement calculé les températures de rosée à partir des mesures de la station (2) (excepté durant une brève période au cours de laquelle l'hygromètre de la station n'a pas fonctionné et où nous avons interpolé les données de l'hygromètre de la tombe).

Nous avons donc été capables de déterminer la hauteur d'eau de pluie tombée et d'estimer l'étendue de la condensation et de l'évaporation, qui sont reliées au signe de la différence entre la température de rosée ( $T_d$ ) et la température intérieure du sarcophage.

### 3. Analyse des données

La différence de température entre l'air, la pierre, et l'eau contenue dans le sarcophage est petite et n'excède jamais 1 K, avec une température de l'eau toujours la plus froide (ceci parce que l'eau se trouve toujours au fond du sarcophage). En conséquence, la condensation se produit de préférence sur l'eau. Comme l'évaporation de l'eau est aussi contrôlée par cette température, nous avons en conséquence seulement considéré la température de l'eau ( $T_w$ ) pour estimer la condensation dans le sarcophage et l'évaporation par échange avec l'air extérieur. Quand le sarcophage est sec, le capteur mesure la température de la pierre du côté intérieur. La température ( $T_3$ ) de la surface extérieure de la pierre du sarcophage est comprise entre  $T_w$  et celle de l'air extérieur.  $T_3$  n'atteint qu'exceptionnellement le point de rosée.

Nous avons d'abord essayé de mettre en corrélation la hauteur de pluie mesurée à la station (débit  $dr/dt$ ) et le débit d'eau créé dans la tombe ( $dV/dt$ ). Ici  $dt$  est le temps, exprimé en jours, s'écoulant entre deux puisages d'eau. La chute de pluie est exprimée en mm par jour, avec une incertitude relative  $\delta r/r = 1/r$ . Le volume  $V$  est exprimé en litres par jour et l'incertitude  $\delta V$  provient de l'erreur sur la mesure du niveau d'eau  $\delta h = 0,5\text{cm}$ . L'erreur  $\delta V$  est estimée selon la différence :

$$\delta V = V(h + 0,5) - V(h)$$

où  $V(h)$  et  $V(h + 0,5)$  sont calculés séparément. Sur la Fig.3a les données sont indiquées en fonction du temps. Sur la durée des mesures, et en dépit de l'éparpillement des données, il est clair qu'une forte corrélation existe entre ces deux quantités. Ceci est rendu plus clair si l'évolution de  $(dV/dt)$  est tracée en fonction de  $(dr/dt)$  (Fig.3b). La méthode de la droite des "moindres carrés" appliquée à l'expression simple :

$$dV/dt = a_0 (dr/dt) + b \quad (9)$$

avec  $a_0$  comme paramètre ajustable donne  $a_0 = (0,107 \pm 0,007) \text{ m}^2$  et  $b = (0,13 \pm 0,02) \text{ l/jour}$ .

Ici les données ont été pondérées à partir des erreurs  $\delta r$  et  $\delta V$ . La faible valeur du coefficient de corrélation linéaire,  $R = 0,23$ , reflète l'éparpillement des données. Cet éparpillement est principalement dû à la présence de condensation (p. ex.  $dV/dt > 0$  quand  $dr/dt = 0$ ) ou d'évaporation (p. ex.  $dV/dt < 0$  quand  $dr/dt = 0$ ). Une valeur positive non nulle de  $b$  peut être expliquée par la prévalence de la condensation sur l'évaporation, correspondant à une valeur moyenne de  $(47 \pm 7) \text{ l/an}$ , à comparer à la valeur moyenne de  $(22 \pm 20) \text{ l/an}$  trouvée après une analyse plus complète détaillée ci-après. Si l'on assigne à  $b$  une valeur nulle, on obtient  $a_0 = (0,132 \pm 0,005) \text{ m}^2$  avec  $R = 0,22$ . La signification physique de  $a_0$  est une surface équivalente collectrice de pluie qui sera discutée plus loin. Une fonction non linéaire (du deuxième ou du troisième degré), qui prendrait en compte l'intensité de la chute de pluie, n'améliore pas l'approche. Nous rapportons aussi sur la Fig.3b les données de Perard et Leborgne (Perard et Leborgne, 1961) pour  $V$  en fonction de  $r$ , où  $V$  et  $r$  représentent respectivement le volume d'eau cumulé dans le sarcophage et la pluie mesurée chaque jour (en mm), pendant 14 jours. Les équations (1) et (5) qui relient  $V^*$  et  $h$  s'appliquent au lot complet de mesures. Nous supposons ici une erreur  $\delta h = 1 \text{ mm}$  sur la détermination du niveau de l'eau et une erreur  $\delta V = 0,1 \text{ l}$ , qui s'ajoute à l'erreur précédente. Nous n'avons pas pris en considération le cas où  $h = 0$  car il correspond au volume mort  $V_0^* \approx 2.5 \text{ l}$ , qui revient à faire  $V = V^*$ . Comme la mesure était effectuée chaque jour, nous pouvons exprimer directement  $V$  en fonction de  $r$  de la manière suivante :

$$V = a'_0 r + b' \quad (10)$$

Les résultats sont  $a'_0 = (0,014 \pm 0,003) \text{ m}^2$  et  $b' = (0,08 \pm 0,09) \text{ l}$ , (le coefficient de corrélation  $R = 0,89$ ). Il est important de noter que la condensation est détectée parce que  $V$  croît pour une valeur constante de  $r$  ( $dr/dt = 0$ ). La valeur faible de  $a'_0$  si on la compare à  $a_0$  ( $a'_0 \approx a_0/10$ ) n'a aucune signification particulière puisque le processus d'évaporation peut

normalement être plus important durant cette période que la moyenne annuelle (les données ont été recueillies en Avril).

La valeur de  $b'$  n'a également aucune signification particulière puisque relative au volume mort.

En examinant la Fig.3a, l'on voit que pendant certaines périodes de temps, il n'y avait aucune pluie mais encore une production d'eau ( $dV/dt > 0$ ). En d'autres périodes sans pluie la quantité d'eau contenue diminuait ( $dV/dt < 0$ ). Il est donc clair que condensation et évaporation jouent un rôle significatif. Donc, dans un second traitement des données, nous avons pris en compte la condensation et l'évaporation dans les expressions suivantes:

$$dV/dt = a(dr/dt) + k_c (T_d - T_w) \quad \text{si } T_d - T_w > 0 \quad (11)$$

$$dV/dt = a (dr/dt) + k_v (T_d - T_w) \quad \text{si } T_d - T_w < 0 \quad (12)$$

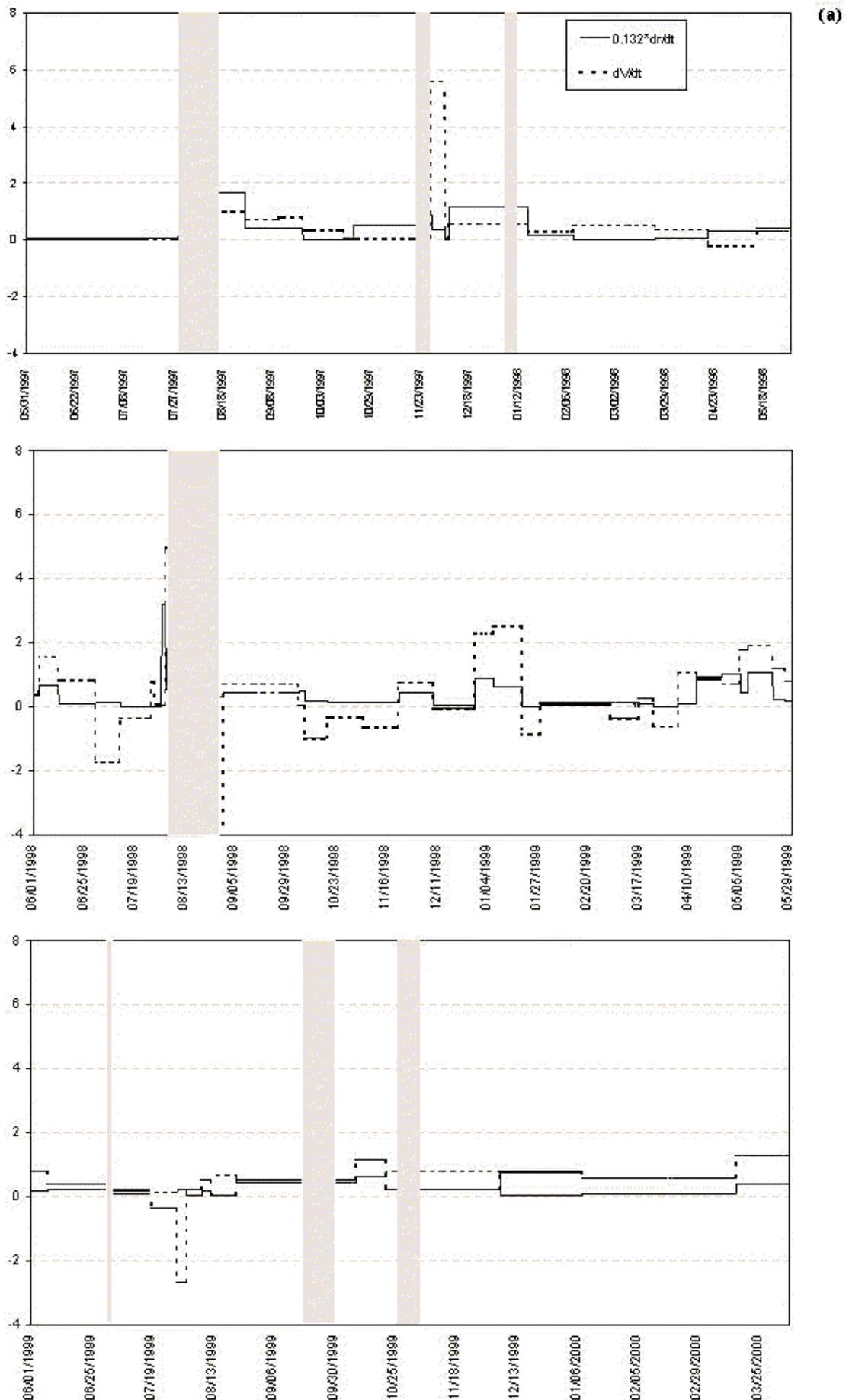
Dans ces expressions, la partie proportionnelle à  $dr/dt$  correspond à la pluie collectée. Le reste correspond à la linéarisation des contributions de la condensation et de l'évaporation par rapport à la température (Nikolayev et al., 1996) : *stricto sensu*, nous aurions dû utiliser la différence des pressions de saturation. Les paramètres  $k_c$  et  $k_v$  caractérisent les coefficients d'échange correspondant respectivement aux processus de condensation et d'évaporation. Ces coefficients sont fonction de la forme du condenseur et ne peuvent être exprimés simplement. Nous avons choisi de les déterminer en utilisant une période sans pluie. Du 25/03/99 au 05/04/99,  $dr/dt = 0$ , et en moyenne une évaporation est intervenue; du 10/02/98 au 23/03/98,  $dr/dt = 0$ , et en moyenne il y a eu condensation. A partir de la méthode des moindres carrés et par une itération des paramètres libres (Figs. 4 et 5), nous trouvons:  $k_c = (0,50 \pm 0,09) \text{ l jour}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $k_v = (0,080 \pm 0,003) \text{ l jour}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Ici, et dans ce qui suit, les erreurs sur les paramètres ont été calculés à partir de la courbure au voisinage du minimum (voir Fig.5), avec une erreur quadratique probable évaluée à  $3,5 \times 10^{-4}$ . Cette valeur a été calculée à partir des erreurs sur  $V$  et  $r$  et est la même que dans le cas de l'équation (9). Nous avons ensuite imposé les valeurs ci-dessus pour  $k_c$  et  $k_v$  dans les équations (11) et (12) afin de traiter l'ensemble du paquet de données et nous avons trouvé:

$$a = (0,180 \pm 0,0075) \text{ m}^2 \quad (\text{Fig. 5}).$$

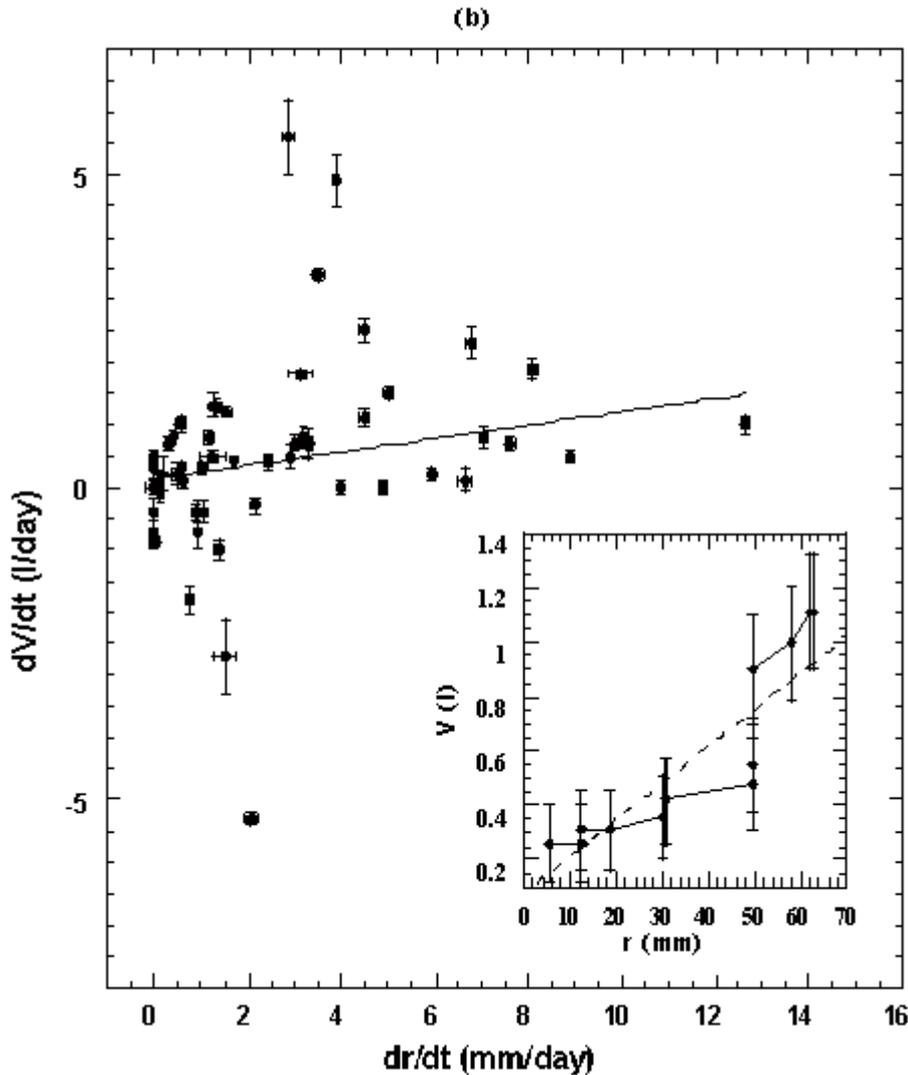
Comme on l'a noté plus haut, on peut considérer  $a$  comme la valeur de la surface du sarcophage réellement collectrice de la pluie. En utilisant l'hypothèse la plus simple selon laquelle la pluie recueillie par la moitié Nord du couvercle pénètre par la fente inclinée entre couvercle et corps du sarcophage (Fig. 1(b)), nous trouvons une surface collectrice équivalente de l'ordre de 25 % de l'aire de la moitié Nord du couvercle ( $0,7 \text{ m}^2$ ), ce qui constitue une valeur tout à fait raisonnable. (A noter que la fente est suffisamment large pour recueillir l'eau de pluie: un calcul simple montre qu'une fente de 0,1 mm d'épaisseur est capable de laisser passer les plus forts orages.).

Il faut noter également qu'il y a une grande différence (un facteur 6) entre le coefficient d'évaporation et celui de condensation. Le sarcophage fonctionne comme un puits glaciaire naturel (Tigaud et Rigaud, 1988). Pendant la nuit, l'air extérieur plus froid que le puits tombe au fond et le refroidit, et pendant la journée, l'air extérieur plus chaud que le puits n'entre que dans la partie supérieure. Cette configuration permet la condensation tout en minimisant l'évaporation.



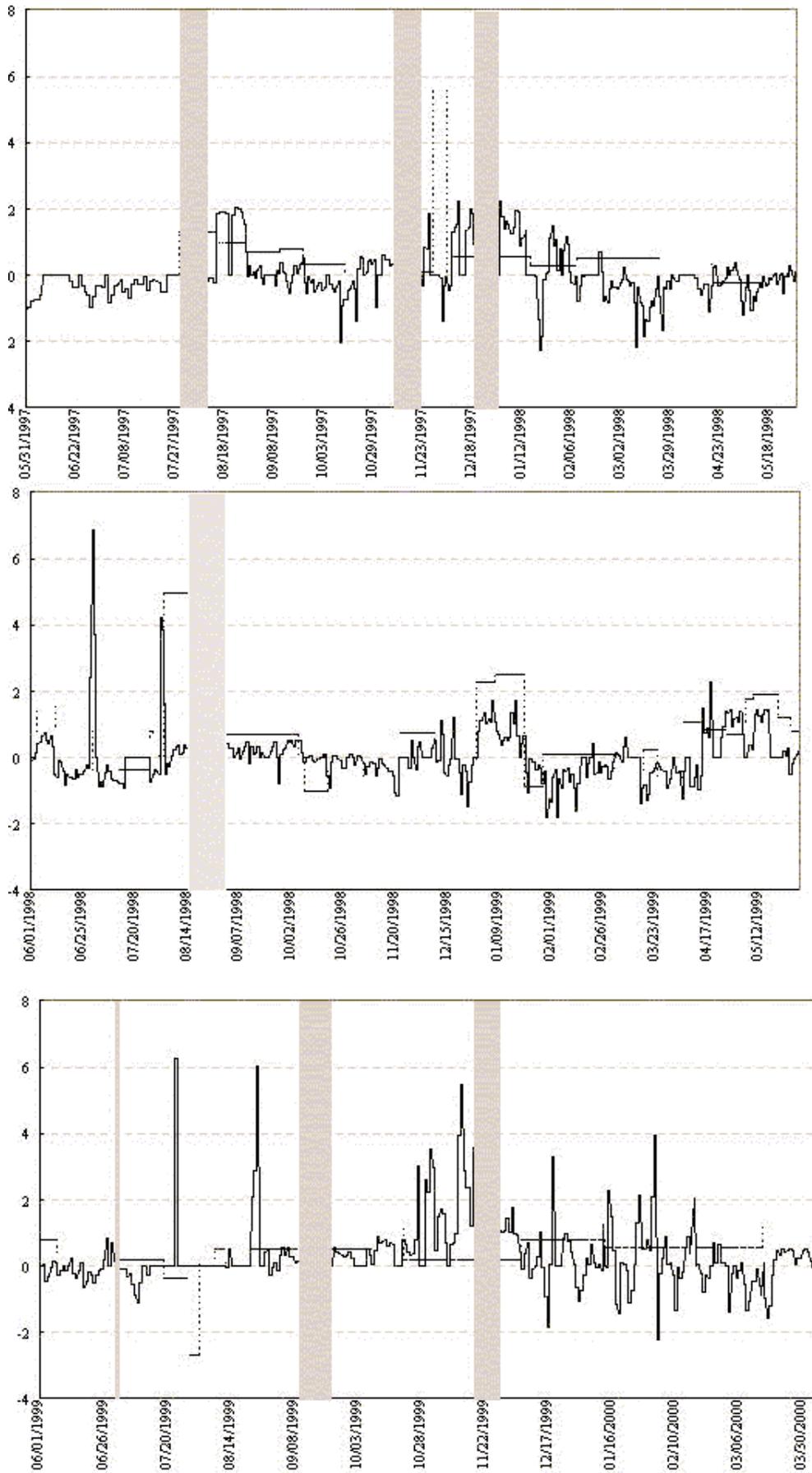
**Fig. 3a** : Production d'eau du sarcophage ( $dV/dt$ ) (en litres par jour, ligne pointillée) comparée aux données réévaluées de la chute de pluie  $0,132 (dr/dt)$  (en mm par jour, ligne continue) entre le 31/05/1997 et le 26/04/2000. Le facteur multiplicatif ( $dr/dt$ ) vient de l'équation (9) pour  $b=0$ . Les zones en grisé correspondent aux périodes où les données n'ont pu être collectées.

Nous pouvons estimer le rôle de la condensation par rapport à celui de la pluie. Une estimation grossière moyenne peut être obtenue en comparant le coefficient ( $a$ ) obtenu dans le cas où il y a de la condensation et de l'évaporation ( $k_c \neq 0$  et  $k_v \neq 0$ , équations 11 et 12) et ( $a_1$ ) obtenu sans condensation ( $k_c = 0$ ,  $k_v \neq 0$ , équation 12). Nous trouvons (Fig. 5)  $a_1 = (0,200 \pm 0,007) \text{ m}^2$ , qui donne une contribution de la condensation de  $(a_1/a - 1) = 0,11 \pm 0,1$ .

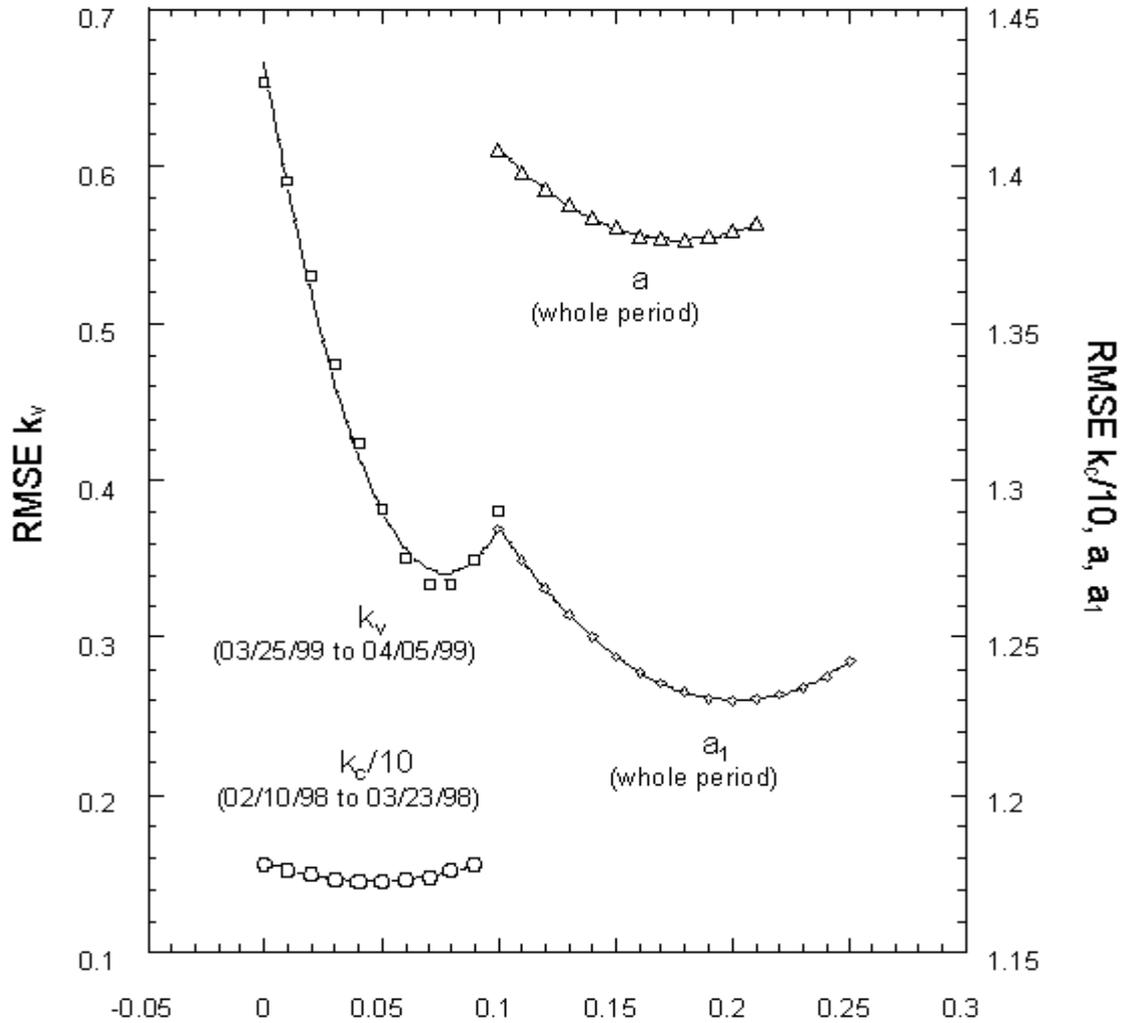


**Fig. 3b** : Corrélation entre la production d'eau du sarcophage ( $dV/dt$ ) (en litres par jour, symboles en traits pleins) et la chute de pluie ( $dr/dt$ ) (en mm par jour). La ligne correspond à l'appréciation la plus probable (voir le texte). L'encadré se réfère aux mesures de Perard et Leborgne (Perard et Leborgne, 1961) (voir texte).

En dépit du fait que l'incertitude sur la valeur précise de la contribution annuelle de la condensation est grande, le phénomène de condensation existe bien et n'est pas négligeable. Le sarcophage fonctionne comme un condenseur de rosée massif semblable à un condenseur de Knapen (Knapen, 1929) à Trans-en-Provence (France), et à celui de Zibold à Feodosia (Crimée), dans une moindre mesure toutefois puisque ce dernier est partiellement refroidi par rayonnement nocturne (Nikolayev et al., 1996). Ces condenseurs "massifs" sont connus pour avoir des rendements faibles ou médiocres (Nikolayev et al., 1996).



**Fig.4** : Production d'eau journalière  $dV/dt$  en litres/jour (ligne pointillée) et approche la plus probable (ligne continue) selon les équations (11) et (12) avec les valeurs de paramètres:  $a = 0,18$ ,  $k_v = 0,08$  et  $k_c = 0,5$ . Les régions en grisé correspondent aux périodes où les données n'ont pu être obtenues.



**Fig. 5 :** Minimisation de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre  $(dV/dt)$  et leur application aux équations (11) et (12) quand les valeurs des paramètres  $a$  ;  $a_1$  ;  $k_c/10$  ;  $k_v$  subissent une itération (voir texte).

#### 4. Remarques pour conclure

Après avoir recueilli des données météorologiques et thermo - physiques pendant près de trois ans, le phénomène de dépôt d'eau dans le sarcophage d'Arles-sur-Tech peut être interprété comme un bilan entre une infiltration d'eau de pluie entre la cuve du sarcophage et son couvercle, une condensation de rosée et son processus complémentaire d'évaporation. Une production d'eau totale d'environ 200 litres par an a été mesurée, avec une contribution de la part de la rosée d'environ 10 % de la production totale, c'est à dire 20 litres par an.

## **Remerciements**

Nous devons manifester notre reconnaissance aux membres de la paroisse d'Arles-sur-Tech pour leur aide et leur amicale collaboration. Nous remercions I. Mylymuk pour son assistance lors des mesures, V. Nikolayev pour son aide dans les calculs et C. Thirriot pour nous avoir donné d'utiles informations au début du travail.

## **Références :**

- Fitzerbet A., 1989. L'eau vive de la Sainte Tombe. Imprimerie catalane, Perpignan.
- Knapen M.A., 1929. Dispositif intérieur du puits aérien Knapen. Extrait des mémoires de la Société des ingénieurs civils de France. Bulletin de Janvier - Février 1929: 1-9 (Imprimerie Chaix Paris).
- Nikolayev V.S., Beysens D., Gioda A., Milimouk I., Katiushin E., et Morel J-P., 1996. Water recovery from dew. Journal of hydrology, 182: 19-35.
- Perard G. et Leborgne C., 1961. L'eau...culte. (La Houille blanche, 6: 873-881).
- Tigaud J.L., et Rigaud P., 1988. Les trous de glace de la Cheire du Côme. (La Dépêche du Parc, Juin 1988) .
- Vallespir M., 1972. Le mystère de la Sainte Tombe. (Le Méridien, La Croix du Midi, Toulouse).