



HAL
open science

Energy consumption analysis of sewage sludge electro-dewatering

Jérémy Olivier, Akrama Mahmoud, Jean Vaxelaire, Jean-Baptiste Conrardy,
Morgane Citeau, Eugène Vorobiev

► **To cite this version:**

Jérémy Olivier, Akrama Mahmoud, Jean Vaxelaire, Jean-Baptiste Conrardy, Morgane Citeau, et al.. Energy consumption analysis of sewage sludge electro-dewatering. 14ème Congrès de la Société Française de Génie des Procédés, Société Française de Génie des Procédés, Oct 2013, Lyon, France. hal-01294496

HAL Id: hal-01294496

<https://hal.science/hal-01294496>

Submitted on 29 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse de la consommation énergétique de l'électro-déshydratation des boues résiduaires urbaines

OLIVIER Jérémy^{a*}, MAHMOUD Akrama^a, VAXELAIRE Jean^a, CONRARDY Jean-Baptiste^a, CITEAU Morgane^b et VOROBIEV Eugène^b

^aLaboratoire de Thermique Energétique et Procédés (EA 1932), ENSGTI - UPPA
Rue Jules Ferry, BP 7511, 64075 Pau Cedex

^bLaboratoire des Transformations Intégrées de la Matière Renouvelables (EA 4297), UTC
BP 20529, 60205 Compiègne Cedex

Résumé

L'électro-déshydratation qui consiste à appliquer un champ électrique pendant le pressage mécanique des boues résiduaires est un procédé qui permet d'augmenter considérablement les performances relativement modestes des procédés de déshydratation mécaniques classiques. Cependant, cette technique engendre un coût énergétique supplémentaire par l'utilisation d'un courant électrique. Dans cette étude, des essais à l'échelle du laboratoire ont été réalisés dans une cellule de filtration-compression pour estimer la consommation énergétique du procédé. Les résultats montrent que cette consommation énergétique dépend principalement du taux de déshydratation atteint et non de l'intensité, de la tension ou de la pression appliquée, ni de la quantité de boue introduite dans la cellule. Ceci est dû au fait que les variations de puissances électriques consommées, observées suite à des modifications des conditions opératoires, sont compensées par les variations de la cinétique de déshydratation. Ainsi, deux essais entraînant la même cinétique de déshydratation, l'un mené à intensité constante, l'autre à tension constante, montrent des profils de consommation énergétique et de puissance électrique similaires.

Mots-clés : électro-osmose, boues activées, boues digérées, déshydratation, filtration

1. Introduction

Pour réduire leur volume, les boues issues des stations d'épuration urbaines doivent être déshydratées avant leur élimination ou leur valorisation. A la sortie des machines industrielles de déshydratation mécanique, la siccité des boues (ou teneur en matières sèches (MS) en $\text{kg}_{\text{MS}}/\text{kg}_{\text{boues}}$) est généralement comprise entre 13 et 33 %. Pour augmenter cette siccité, les boues peuvent être ensuite séchées thermiquement (seule alternative industrielle actuelle). Cependant le coût du séchage thermique est assez élevé et le développement de procédés de déshydratation plus performants est une perspective intéressante. L'électro-déshydratation qui associe à la force de pressage, un champ électrique continu est actuellement le procédé hybride qui donne, à l'échelle du laboratoire, les meilleurs résultats pour les boues résiduaires urbaines (Mahmoud et al., 2013). De nombreuses études (Mahmoud et al., 2010 ; Tuan et al., 2012) montrent que la siccité des boues en fin de déshydratation est largement améliorée par l'ajout du champ électrique, avec des siccités pouvant dépasser les 60 %. Par ailleurs, ce procédé permet une hygiénisation partielle des boues (Navab Daneshmand et al., 2012). Enfin, l'énergie supplémentaire consommée par l'électro-déshydratation est plus faible que celle nécessaire au fonctionnement des procédés de séchage industriels (non solaires) habituellement utilisés (Citeau et al., 2012 ; Mahmoud et al., 2011 ; Saveyn et al., 2006). Cependant, cette énergie dépend des conditions opératoires mises en oeuvre lors de la déshydratation (valeur de la tension ou de l'intensité appliquée par exemple). Le but de cette étude est donc de préciser l'impact des différents paramètres opératoires sur la consommation énergétique lors d'une électro-déshydratation.

2. Outils et méthode

2.1. Boues utilisées

Deux types de boues ont été utilisés pour cette étude. Une boue activée, de siccité initiale 0,5 %, a été prélevée à la station d'épuration de Pau-Lescar (64). Une boue digérée anaérobie, de siccité initiale 2 %, a été prélevée à la station de Cergy-Pontoise (95). Avant leur utilisation, les boues ont été floculées avec deux polymères cationiques linéaires fournis par la société SNF Floerger ; l'un à 60 % de cationicité (pour la boue activée), l'autre à 30 % de cationicité (pour la boue digérée). Les boues floculées ont ensuite été concentrées dans une cellule d'égouttage (Olivier et al., 2004) avant d'être disposées dans la cellule d'électro-déshydratation.

2.2. Cellule d'électro-déshydratation

La cellule d'électro-déshydratation utilisée pour cette étude a été décrite par Mahmoud et al. (2011). Il s'agit d'une cellule de filtration-compression en TeflonTM, de 7 cm de diamètre intérieur comportant une électrode en titane (cathode) placée à la base du dispositif sous la toile filtrante, et une anode en titane revêtu d'une couche d'oxydes de métaux placée sur la partie du piston en contact direct avec la boue. Le filtrat qui ne peut être évacué que du côté cathode est récupéré dans un bêcher placé sur une balance. Une arrivée d'air comprimée (0 à 7 bar) permet de comprimer la boue en poussant sur le piston. Une acquisition de la masse de filtrat, de l'intensité, de la tension, de la température à l'anode et de la température du filtrat est réalisée toutes les trois secondes.

300 grammes de boues égouttées (correspondant à une charge massique de boue de 2,4 g_{MS}/m²) sont disposés dans la cellule, puis sont pressés pendant deux heures sans ajout du champ électrique afin d'obtenir la siccité maximale accessible par pressage mécanique. En conservant la même force de pressage, le champ électrique est alors appliqué au maximum pendant deux heures. Le filtrat supplémentaire récupéré pendant la deuxième étape du procédé (présence du champ électrique) est donc extrait uniquement par l'action conjointe des champs de forces mécaniques et électriques. L'énergie totale consommée peut alors être calculée, en divisant l'énergie apportée par le champ électrique (pendant toute la durée de la seconde étape) par la quantité de filtrat supplémentaire récupérée pendant cette même étape. La siccité finale du gâteau de boue est calculée en mesurant les matières sèches du gâteau obtenues après passage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures (Norme NF-T- 90029).

3. Résultats et discussion

3.1. Fonctionnement à tension constante

Le champ électrique est appliqué en générant un courant de tension constante (de 10 à 50 V). Les tensions étudiées ont été de 10, 20, 30, 40 et 50 V. Avec ce mode de fonctionnement un pic d'intensité et un pic de température, d'autant plus haut que la tension appliquée est élevée, sont observés. L'extraction du filtrat s'arrête naturellement suite à la chute de l'intensité. Par ailleurs, l'augmentation de la tension entraîne une augmentation de la cinétique de déshydratation, de la siccité finale atteinte et de la consommation énergétique totale pour les boues activées (Mahmoud et al., 2011) et pour les boues digérées (figure 1a). Il y a donc une relation étroite entre la valeur de la tension, la siccité finale atteinte et la consommation énergétique totale. La figure 1b montre qu'il existe, en fait, une corrélation forte entre la siccité finale atteinte et la consommation énergétique finale qui permet de supposer que la consommation énergétique ne dépend pas de la tension mais uniquement de la siccité atteinte.

Pour vérifier cette hypothèse, une consommation énergétique dite « instantanée » ($E_{inst,0.5}$) a été calculée sur des intervalles de 0,5 points de siccité atteinte en divisant l'énergie électrique consommée ($U * I * \Delta t$ en J) pour augmenter la siccité de 0,5 points (exemple de 20 à 20,5 % de siccité) par la masse de filtrat extraite nécessaire pour élever la siccité de 0,5 points :

$$E_{inst,0.5}(Si) = \frac{U \times I \times \Delta t_{0.5}}{\Delta m_{f,0.5}} = \frac{P_{0.5}(Si)}{q_{f,0.5}(Si)} \quad (1)$$

$E_{inst,0,5}$ en J/kg est l'énergie électrique instantanée consommée, Si en % est la siccité atteinte, U en V est la tension, I en A est l'intensité, $\Delta t_{0,5}$ en s est le temps nécessaire pour augmenter la siccité de 0,5 points, $\Delta m_{f,0,5}$ en kg est la masse de filtrat récupérée grâce au champ électrique pour augmenter la siccité de 0,5 points, $P_{0,5} = U * I$ en W est la puissance électrique consommée pour augmenter la siccité de 0,5 points et $q_{f,0,5}$ en kg/s est le débit de filtrat récupéré pour augmenter la siccité de 0,5 points.

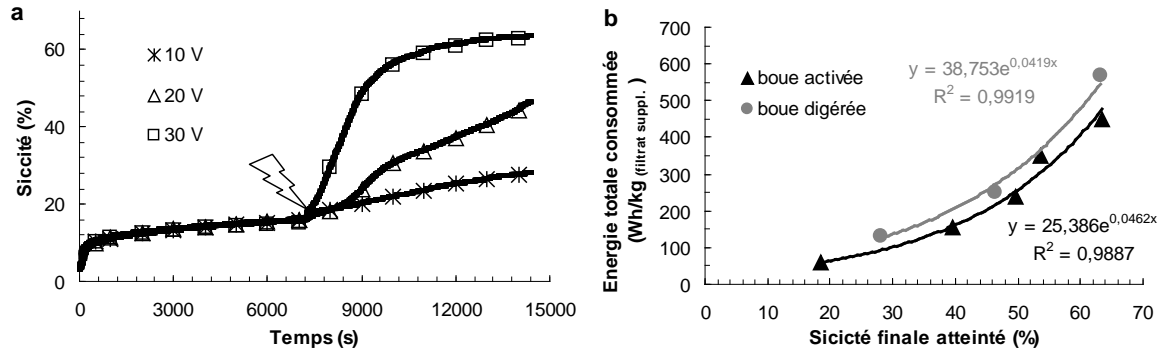


Figure 1. (a) Evolution de la siccité des boues digérées pour des essais d'électro-déshydratation menés à 4 bar et à différentes tensions, (b) évolution de la consommation énergétique totale de l'électro-déshydratation pour des boues activées et des boues digérées en fonction de la siccité finale atteinte (série d'essais menés à 4 bar et à différentes tensions)

Les profils de $E_{inst,0,5}$ en fonction de la siccité ont été tracés pour différentes tensions appliquées pour les boues activées et les boues digérées. D'après la figure 2a, ces profils sont, en première approximation, confondus quelle que soit la tension appliquée. La consommation énergétique ne dépend donc pas de la valeur de la tension appliquée mais bien de la valeur de la siccité atteinte.

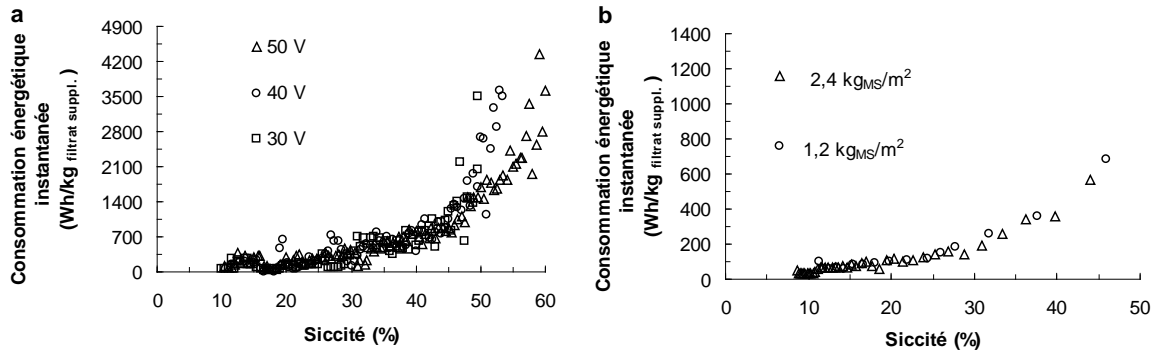


Figure 2. Evolution de la consommation énergétique instantanée de l'électro-déshydratation de boues activées en fonction de la siccité atteinte ;(a) essais réalisés à 4 bar avec des tensions appliquées différentes, (b) essais menés à 5 bar avec une tension appliquée de 25 V et différentes charges massiques de boue.

De l'équation 1, il est possible de déduire que l'augmentation de la puissance électrique consommée (P) due à l'application d'une tension plus élevée (qui engendre une intensité mesurée plus élevée également) est contrebalancée par l'augmentation de la cinétique (donc du débit $q_{f,0,5}$). Pour confirmer ce résultat, des essais ont été réalisés pour une tension fixée en diminuant la charge de boue (en kg_{MS}/m²) introduite dans la cellule et donc l'épaisseur du gâteau soumis à l'électro-déshydratation. Ainsi, le champ électrique à travers le gâteau, exprimé en V/cm, a pu être modifié, d'un essai à l'autre. Les résultats obtenus par cette série d'expériences montrent qu'en diminuant l'épaisseur, l'intensité mesurée à travers le gâteau

augmente, la cinétique de déshydratation est accélérée et la siccité finale est plus élevée ainsi que la consommation énergétique totale. La figure 2b montre, à nouveau, que les profils de $E_{inst,0.5}$ sont confondus, ce qui confirme le fait que la consommation énergétique dépend de la siccité finale et que l'augmentation de puissance est contrebalancée par l'accélération de la cinétique. Des essais réalisés à différentes pressions (2-12 bar) confirment également que la consommation énergétique ne dépend pas de la pression. De ces résultats, il est possible de conclure que, pour un fonctionnement à tension constante, la consommation énergétique dépend principalement de la siccité atteinte en fonctionnant à tension constante. Aussi, le contrôle du taux de déshydratation permet de contrôler la consommation énergétique. D'après la figure 2a, pour la boue activée étudiée, l'électro-déshydratation consomme moins d'énergie que les procédés de séchage thermique pour une siccité inférieure à 35 % et consomme plus d'énergie au-delà de 47 % de siccité. Sur cette figure, la plage de consommation énergétique du séchage industriel des boues est représentée par une zone en pointillées entre 700 et 1300 Wh/kg_{eau évaporée}. Dans le cas de la boue digérée étudiée, le procédé dépasse la valeur haute des procédés de séchage à partir de 59 % de siccité. Les consommations énergétiques totales pour l'électro-déshydratation (figure 1) sont en général nettement en dessous des valeurs du séchage thermique, ceci est principalement dû au faible coût énergétique induit pour atteindre des siccités inférieures à 20 % (figure 2). Ce niveau de siccité correspond par ailleurs aux situations pour lesquelles les plus grandes quantités d'eau sont extraites. En effet, passer de 50 à 60 % de siccité nécessite, dans le cas de l'électro-déshydratation des boues activées, un apport énergétique très important pour seulement 4 % du filtrat extrait par le champ électrique (dans les conditions des essais de l'étude). Ainsi, l'avantage en terme de coût énergétique qu'offre le procédé d'électro-déshydratation par rapport au séchage thermique est d'autant plus marqué que la teneur en eau de boue à traiter est grande. C'est le cas des boues difficiles à déshydrater mécaniquement pour lesquelles les siccités en fin de compression mécanique (sorties des dispositifs industriels classiques) sont inférieures à 20 %.

3.2. Fonctionnement à intensité constante

Le procédé d'électro-déshydratation peut également fonctionner à intensité constante. Dans ce cas, la tension et la température augmentent de façon continue avec l'accroissement de la résistance électrique du gâteau de boue. Le procédé ne s'arrête pas naturellement, il faut le stopper pour éviter une température trop importante qui pourrait engendrer la dégradation de la toile filtrante et des électrodes. Les essais à intensité constante (ou densité de courant constante en A/m²) montrent qu'une augmentation de l'intensité engendre une cinétique de déshydratation plus rapide et une tension à travers le gâteau plus forte (Olivier et al., 2011 ; Citeau et al., 2012). Par ailleurs, pour une intensité fixée, la diminution de l'épaisseur du gâteau soumis à l'électro-déshydratation (obtenu par réduction de la charge de boue introduite dans la cellule) entraîne également une cinétique de déshydratation plus rapide et une tension à travers le gâteau plus forte.

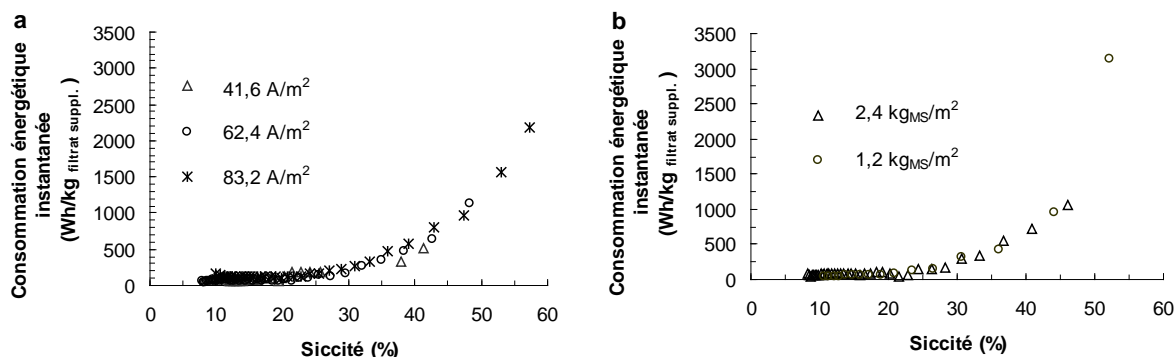


Figure 3. Evolution de la consommation énergétique instantanée de l'électro-déshydratation de boues activées en fonction de la siccité atteinte ; (a) essais réalisés à 5 bar pour différentes intensités appliquées, (b) essais menés à 5 bar avec une intensité appliquée de 62,4 A/m² et différentes charges massiques de boue

La figure 3 montre que dans ces deux cas, les profils de $E_{inst,0.5}$ sont identiques quelle que soit l'intensité ou la charge de boue. Ceci confirme le fait que la consommation énergétique ne dépend que de la siccité atteinte et que l'augmentation de puissance électrique est compensée par l'accélération de la cinétique.

Ce résultat, confirmé à I et U constantes, indique que l'équation 1 peut servir à prédire empiriquement, à partir d'un seul essai, le profil de consommation énergétique pour d'autres conditions opératoires mais aussi la puissance consommée (P) et donc le profil de I ou U.

3.3 Comparaisons d'essais menés à U et I constantes

La question de savoir quel fonctionnement, U ou I constante, est le moins coûteux énergétiquement, n'a pas encore été complètement résolue. D'après l'équation 1, deux essais présentant la même cinétique de déshydratation (donc même $q_{f,0.5}$) doivent avoir le même profil de puissance consommée si les profils de $E_{inst,0.5}$ en fonction de la siccité sont bien identiques. Pour vérifier cela, plusieurs essais ont été menés à intensité ou tension constante afin d'obtenir des couples intensité/tension permettant d'obtenir des cinétiques de déshydratation similaires. Les couples suivants ont été déterminés pour la boue activée étudiée : 20 V et 41,6 A/m² ; 25 V et 62,4 A/m² ; et 30 V et 83,2 A/m². Pour plus de clarté, seuls les résultats obtenus pour le couple 25 V et 62,4 A/m² sont présentés (figure 4). Des évolutions similaires ont été observées avec les deux autres couples de valeurs.

La figure 4a indique une cinétique de déshydratation identique pour les deux essais jusqu'à 41 % de siccité, puis les courbes divergent. Le moment où les cinétiques divergent est représenté par une flèche noire sur la figure 4. A tension constante, la déshydratation s'arrête naturellement, la siccité tend vers une asymptote horizontale (figure 4a) et l'intensité à travers le gâteau chute de façon drastique (figure 4 b). A intensité constante, la déshydratation se poursuit (figure 4a) avec une élévation continue de la tension (figure 4c). Malgré des profils très différents de tension et d'intensité (figures 4b et 4c), la résistance électrique de la boue suit un unique profil pour les deux essais (figure 4d). Le suivi de l'évolution de la puissance électrique consommée en fonction de la siccité montre que, pour une siccité inférieure à 41 % (plage correspondant à des cinétiques de déshydratation identiques), les puissances consommées sont similaires (figure 4e). Les puissances consommées divergent quand les cinétiques divergent, ceci en raison de l'augmentation de la tension dans un cas et de la diminution de l'intensité dans l'autre cas. La figure 4f confirme que les profils de $E_{inst,0.5}$ sont identiques pour les deux essais. Ce résultat renforce l'intérêt de l'équation 1 pour prédire les profils de puissance et donc la consommation énergétique du procédé.

Par ailleurs, la comparaison entre des essais à tension constante et d'autres à intensité constante amène aux commentaires suivants :

- la siccité finale atteinte ne semble dépendre que de la tension appliquée. A tension constante, si la tension augmente, la siccité finale augmente. Si l'épaisseur diminue, la siccité finale augmente (car le champ électrique exprimé en V/cm est plus important). A intensité constante, la déshydratation se poursuit, la siccité continue à augmenter car la tension augmente de façon continue. De l'eau de plus en plus difficile à extraire (eau liée aux particules solides ou bien emprisonnée dans les cellules biologiques) peut être retirée.
- La cinétique dépend fortement de l'intensité. A tension constante, la cinétique s'arrête suite à une chute importante de l'intensité. Par ailleurs, plus la tension est élevée, plus l'intensité mesurée à travers le gâteau est élevée et plus la cinétique est rapide. De même, en diminuant l'épaisseur des boues, l'intensité mesurée est plus importante et la cinétique s'accélère. Cela semble cohérent avec le fait que l'électro-déshydratation est un phénomène électrique donc lié à la quantité d'électrons échangés entre les électrodes et le système. La cinétique de déshydratation dépend également de la résistance électrique initiale des boues. En modifiant la charge massique en boue, la cinétique à intensité constante est modifiée. Par conséquent, si la résistance électrique initiale de la boue est trop élevée (avec par exemple une charge de boue à traiter trop importante), le procédé ne démarrera pas. Par conséquent, pour chaque boue un optimum existe entre le débit (kg_{MS}/s) et la charge (kg_{MS}/m²) de boue à traiter.

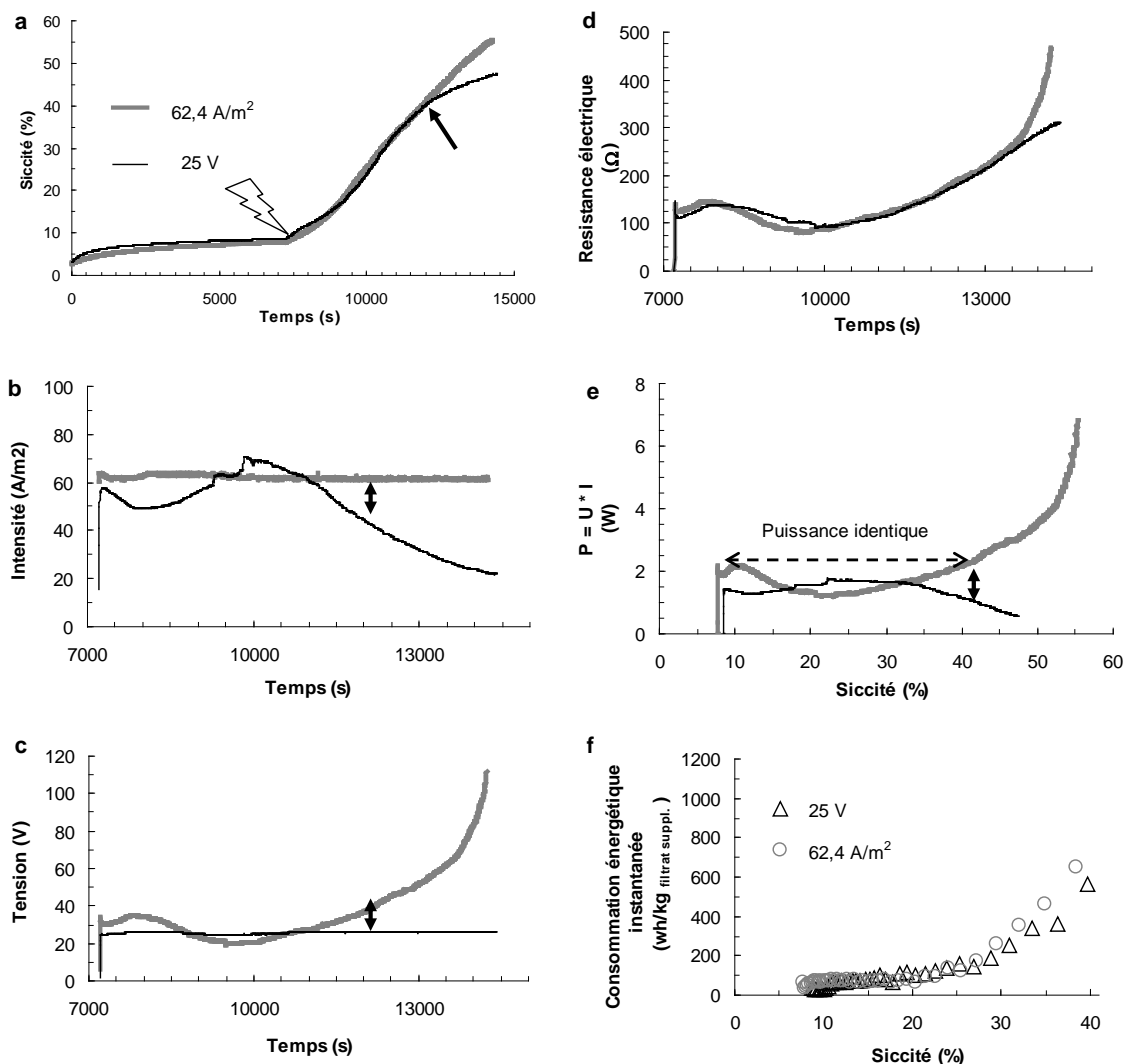


Figure 4. Comparaison de deux essais d'électro-déshydratation de boues activées menés à 5 bar, l'un avec une intensité constante de 62,4 A/m², l'autre avec une tension constante de 25 V. Evolution de : (a) la siccité, (b) l'intensité, (c) la tension, (d) la résistance électrique du gâteau, (e) la puissance électrique consommée, (f) la consommation énergétique instantanée

Conclusion

La consommation énergétique de l'électro-déshydratation des boues résiduaires urbaines ne dépend pas de l'intensité, de la tension ou de la pression appliquées, ni de la charge massique de boue à traiter mais principalement de la siccité atteinte. Ceci est dû au fait que les variations de la cinétique de déshydratation engendrées par une modification des conditions opératoires compensent les variations de la puissance électrique consommée. La consommation énergétique du procédé peut ainsi être contrôlée en maîtrisant le taux de déshydratation des boues.

Par ailleurs, la déshydratation étant plus rapide aux fortes valeurs d'intensité et de tension, il semble plus intéressant de travailler à ces valeurs élevées. L'élément limitant sera cependant l'élévation de température, induite par effet Joule, qui peut dégrader la toile filtrante et les électrodes.

La consommation énergétique aux faibles siccités est moindre qu'aux siccités élevées. Le procédé paraît donc énergétiquement d'autant plus avantageux (par rapport au séchage thermique) que les boues sont difficiles à déshydrater mécaniquement (siccité initiale basse).

Enfin, il semblerait que la cinétique d'électro-déshydratation dépende principalement de l'intensité et de l'épaisseur des boues tandis que la siccité maximale accessible étant quant à elle principalement dépendante de la tension appliquée.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-08-ECOT-018-004) pour son support financier au projet COTEDEM

Références

- Citeau, M., Olivier, J., Mahmoud, A., Vaxelaire, J., Larue, O. et Vorobiev, E., 2012, Pressurised electro-osmotic dewatering of activated and anaerobically digested sludges: electrical variables analysis, *Wat. Res.*, 46, 4405-4416.
- Mahmoud, A., Olivier, J., Vaxelaire, J. et Hoadley, A.F.A., 2010, Electrical field: a historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering, *Wat. Res.*, 44, 2381-2407.
- Mahmoud, A., Olivier, J., Vaxelaire, J. et Hoadley, A.F.A., 2011, Electro-dewatering of wastewater sludge: influence of the operating conditions and their interactions effects, *Wat. Res.*, 45, 2795-2810.
- Mahmoud, A., Olivier, J., Vaxelaire, J. et Hoadley, A.F.A., 2013, Advances in mechanical dewatering of wastewater sludge treatment, in *Wastewater Reuse and Management*, Sharma S.K. and Sanghi R. Eds, Springer, 253-303.
- Navab Daneshmand, T., Beton, R., Hille, R.J., Gehr, R. et Frigon, D., 2012, Inactivation mechanisms of bacterial pathogen indicators during electro-dewatering of activated sludge biosolids, *Wat. Res.*, 46, 3999-4008.
- Olivier, J., Citeau, M., Mahmoud, A., Vaxelaire, J. et Vorobiev, E., 2011, Etude de l'électro-déshydratation appliquée à des boues activées et des boues digérées, 13^{ème} congrès SFGP 2011, Lille, France. *Proceed. : Récents Progrès en Génie des Procédés*, n° 101.
- Olivier, J., Vaxelaire, J. et Ginisty, P., 2004, Gravity drainage of activated sludge: from laboratory experiments to industrial process, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 79, 461-467.
- Saveyn, H., Van der Meeren, P., Pauwels, G. et Timmerman, R., 2006, Bench- and pilot-scale sludge dewatering in a diaphragm filter press, *Wat. Sci. Technol.*, 54, 53-60.
- Tuan, P.-A., Isosaari, P. et Sillanpää, M., 2012, Sewage sludge electro-dewatering treatment – A review, *Drying Technol.*, 30, 691-706.

Energy consumption analysis of sewage sludge electro-dewatering

OLIVIER Jérémy^{a*}, MAHMOUD Akrama^a, VAXELAIRE Jean^a, CONRARDY Jean-Baptiste^a, CITEAU Morgane^b et VOROBIEV Eugène^b

^aLaboratoire de Thermique Energétique et Procédés (EA 1932), ENSGTI - UPPA
Rue Jules Ferry, BP 7511, 64075 Pau Cedex

^bLaboratoire des Transformations Intégrées de la Matière Renouvelables (EA 4297), UTC
BP 20529, 60205 Compiègne Cedex

Abstract

Electro-dewatering experiments were carried out with a laboratory scale device, to analyse the energy consumption under both, a constant voltage (C.V.) and a constant current density (C.C). The results of the C.V. experiments showed a very strong correlation between the final dryness of the sludge filter-cake and the total energy consumption (kWh/kg_{additional water removed}). The results showed that the energy consumption depends mainly on the reached dryness. It does not significantly depend on other process parameters such as: the applied voltage, the applied current density (in A/m²_{filter surface}), the applied pressure or the initial amount of sludge. In fact, the change in electrical power consumption due to different test conditions was balanced by changes in dewatering kinetics. The comparison between two tests (one with C.V. conditions, the other with C.C. conditions) showed that the kinetics were similar when the electrical power consumption was the same.

Keywords : electro-osmosis, activated sludge, digested sludge, dewatering, filtration

* Authors(s) to whom the correspondence should be sent : jeremy.olivier@univ-pau.fr