International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

Validation Numérique De La Configuration D'un Système Hybride Tour Solaire À Cheminée Avec Stockage Par Volant D'inertie Application : Alimentation Du Lpader A L'université De Mahajanga, Madagascar

HOUSSEN Fils Auguste[1], DONA Victorien Bruno[2]

[1]Doctorant, École Doctorale Génie du Vivant et Modélisation (EDGVM), Université de Mahajanga, Madagascar.
[2]Professeur, Laboratoire de Physique Appliquée au Développement des Énergies Renouvelables (LPADER), École Doctorale Génie du Vivant et Modélisation (EDGVM), Université de Mahajanga, Madagascar.
[1]Adresse e-mail : houssenfilsauguste@gmail.com , [2]Adresse e-mail ,bvdno2@gmail.com

Auteur Correspondant: HOUSSEN Fils Auguste. E-mail : houssenfilsauguste@gmail.com

(cc) BY

Résumé : Cet article porte sur la configuration d'un système hybride autonome, qui associe une centrale à cheminée solaire (CCS) à un volant d'inertie pour alimenter un laboratoire de recherche (LPADER, Université de Mahajanga). La turbine-génératrice de la tour (PMSG G1) et le volant, entraîné par une seconde machine synchrone (PMSG G2) commandée en MLI vectorielle, échangent leur énergie par un bus continu commun de 300 V. La demande du laboratoire, reconstruite à partir de dix équipements, s'élève à 29,04 kWh.j^{-1} avec une pointe de 2 805 W. Nous utilisons les durées d'insolation et les températures de l'ASECNA sur quinze années consécutives (2010 à 2024). Les simulations portent sur janvier, mois de plus faible insolation, et sur octobre, mois le plus favorable de l'année moyenne : le modèle de Liu et Jordan, avec les coefficients d'Ångström–Prescott de Glover et McCulloch et la fraction diffuse de Collares-Pereira et Rabl, donne 5,64 et 7,66 kWh.m^{-2} par jour sur le collecteur horizontal, et la tour de 109 m, avec le collecteur de 91,0 m retenu au deuxième article, produit 36,98 et 49,90 kWh par jour. Les onze critères de vérification sont satisfaits, dont trois (V4, V5, V7) ne sont que des contrôles de cohérence interne. Le modèle de la tour retrouve l'échauffement et la vitesse de l'air de Manzanares (écarts de −4,5 et +3,4 %), mais sa puissance n'est retrouvée qu'avec le rendement de la turbine du prototype (0,42 au lieu de 0,72). La tension du bus dépasse la f.é.m. composée de crête de G2 (261 V, indice de modulation de 0,87), et la jante garde un coefficient de sécurité de 3,26 selon une approximation d'anneau mince. Couplés, la tour et le volant de 11,8 kg.m^2 couvrent toute la charge en janvier comme en octobre, et le volant restitue 9,51 et 10,01 kWh par jour avec un rendement journalier voisin de 89,5 %. La configuration est donc cohérente, mais elle n'est pas validée expérimentalement, et la production de la tour, qui correspond à l'optimum de Schlaich, doit être interprétée comme une borne supérieure.

Mots-clés : système hybride, centrale à cheminée solaire, volant d'inertie, bus continu, validation de modèles, modèle de Liu et Jordan, modèle de Schlaich, PMSG, compatibilité électrique, Mahajanga.

Abstract: This first paper presents the configuration of a stand-alone, battery-free hybrid system that pairs a solar chimney power plant (SCPP) with a flywheel to supply a research laboratory (LPADER, University of Mahajanga). The turbine-generator of the tower (PMSG G1) and the flywheel, driven by a second synchronous machine (PMSG G2) under space-vector PWM, exchange energy through a common 300 V DC bus. The laboratory demand, rebuilt from ten devices, comes to 29.04 kWh.day^{-1} with a 2,805 W peak. We use ASECNA sunshine durations and temperatures over fifteen consecutive years (2010 to 2024). The simulations cover January, the month with the least sunshine, and October, the most favourable month of the average year: the Liu and Jordan model, with the Glover and McCulloch Ångström–Prescott coefficients and the Collares-Pereira and Rabl diffuse fraction, gives 5.64 and 7.66 kWh.m^{-2} per day

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

on the horizontal collector, and the 109 m tower, with the 91.0 m collector retained in the second paper, produces 36.98 and 49.90 kWh per day. All eleven verification criteria are met, three of which (V4, V5, V7) are only internal consistency checks. The tower model reproduces the air temperature rise and velocity of Manzanares (−4.5 and +3.4 %), but its power is matched only with the prototype's turbine efficiency (0.42 instead of 0.72). The bus voltage exceeds the peak line back-EMF of G2 (261 V, modulation index 0.87), and the rim keeps a safety factor of 3.26 under a thin-ring approximation. Coupled together, the tower and the 11.8 kg.m² flywheel cover the whole load in January and in October, and the flywheel returns 9.51 and 10.01 kWh per day with a daily efficiency close to 89.5 %. The configuration is therefore consistent but not experimentally validated, and the tower output, which is that of Schlaich's optimum, should be read as an upper bound.

Keywords: hybrid system, solar chimney power plant, flywheel, DC bus, model validation, Liu and Jordan model, Schlaich model, PMSG, electrical compatibility, Mahajanga.

I. INTRODUCTION

Lorsque le réseau ne fonctionne pas suffisamment, comme dans les laboratoires de recherche ou les maisons isolées, la production solaire décentralisée devient la solution la plus courante [1], [2]. Parmi les filières possibles, la centrale à cheminée solaire (CCS) se distingue par sa simplicité : l'air chauffé sous un vaste collecteur transparent s'élève par tirage thermique dans une cheminée et entraîne, à sa base, une turbine couplée à un générateur [3], [4], [5]. Sa production suit pourtant l'ensoleillement, et il faut stocker de l'énergie pour couvrir la soirée. Face aux batteries électrochimiques, le volant d'inertie supporte plusieurs centaines de milliers de cycles, réagit presque instantanément et ne subit aucune dégradation chimique ; en revanche, il perd de l'énergie en permanence à vide [6], [7].

Avant de dimensionner un tel système, il faut s'assurer que sa configuration est cohérente, et trois questions se posent. La première concerne les données : à Madagascar, les stations météorologiques relèvent surtout la durée d'insolation, la température et la pression, et mesurent rarement l'irradiation globale. Il faut donc reconstituer le rayonnement reçu par le collecteur horizontal de la tour. Le modèle de Liu et Jordan [8], associé à la relation d'Ångström–Prescott [9], [10] sous la forme de Glover et McCulloch [11] et à la corrélation de Collares-Pereira et Rabl [12], convient à cet exercice parce qu'il demande peu de paramètres. La deuxième porte sur le modèle de la tour, qui doit retrouver des données de référence : mesures de Manzanares [3], [13] et borne de Schlaich [5], [14]. La troisième concerne la compatibilité des composants entre eux : tension du bus, plage de vitesse du volant, indice de modulation du variateur et tenue mécanique du rotor doivent former un ensemble réalisable [15], [16]. Cet article est le premier d'une série de trois consacrée au système CCS–volant du LPADER : le deuxième optimise le dimensionnement (diamètre du collecteur, moment d'inertie du volant, puissance de la machine G2), et le troisième étudie l'exploitation.

II.MATÉRIELS ET MÉTHODES

A. Matériels

1. Présentation du site d'étude

Le LPADER se trouve à Mahajanga, sur la côte nord-ouest de Madagascar. Les données de température et d'insolation viennent de la station ASECNA de Mahajanga et couvrent quinze années consécutives, de 2010 à 2024 [17]. Avant tout calcul, la série est contrôlée : une durée d'insolation est rejetée si elle dépasse 90 % de la durée astronomique du jour ou si elle est inférieure à la moitié du minimum des autres années, et huit valeurs sur 180 sont ainsi remplacées par la moyenne des autres années du même mois. Les simulations portent sur deux mois de l'année moyenne : janvier, au cœur de la saison des pluies, mois de plus faible insolation (5,46 $h.j^{-1}$) et de plus faible indice de clarté, et octobre, à la fin de la saison sèche, mois le plus favorable (10,47 $h.j^{-1}$). Le site se trouve à 15°43′ S et 46°19′ E, à 22 m d'altitude ; la Fig. 3 (III-A) donne, pour chaque mois, l'insolation moyenne et le gisement journalier du collecteur horizontal, en année moyenne et dans l'année la plus défavorable. La température ambiante horaire (6) fixe le rendement de la cheminée ; le modèle garde 30 °C comme température de référence pour les contrôles V4 à V8.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

2. Configuration du système

La Fig. 1 donne la configuration générale du système. Elle réunit la production solaire (tour à cheminée, turbine-génératrice G1 et redresseur), le système inertiel de stockage d'énergie (SISE : volant, machine synchrone à aimants permanents G2 et variateur) et la charge du laboratoire, sous le contrôle du système de gestion de l'énergie (EMS, II-B.7). En moteur, la machine G2 accélère le volant et stocke l'excédent sous forme d'énergie cinétique ; en générateur, elle restitue cette énergie [7], [18].

Ces sous-ensembles échangent tous leur énergie à travers un bus continu commun de 300 V, représenté à la Fig. 1. G1 s'y raccorde par un redresseur et la machine G2 par un variateur bidirectionnel à modulation de largeur d'impulsion (MLI) vectorielle. Les charges alternatives et continues du laboratoire sont alimentées directement depuis le bus, par un onduleur DC/AC et par un convertisseur DC/DC abaisseur ; nous ne modélisons pas ces deux interfaces. Un bus continu commun simplifie le contrôle, centralise la gestion de l'énergie et laisse la porte ouverte à d'autres sources ou à d'autres stockages [19], [20], [21]. Le diamètre D du collecteur, le moment d'inertie J du volant et la puissance nominale P_n de G2 relèvent du dimensionnement (deuxième article) : aucune des grandeurs validées ici n'en dépend, et seuls les contrôles numériques du modèle de la tour et le couplage (III-D) reprennent les valeurs retenues, D = 91,0 m, J = 11,8 kg.m^2 et P_n = 5,5 kW.

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES DE LA CONFIGURATION RETENUE DANS LE MODÈLE

Sous-système	**Caractéristiques**
Charge LPADER	Dix équipements, 85 % de l'énergie en alternatif ; $P_{L,\max}$ = 2 805 W ; E_L = 29,04 kWh/j
Bus continu	300 V commun (fenêtre de 270 à 330 V) ; gestion de l'énergie par le volant seul, sans batterie (Tableau 3)
CCS et G1	H_{ch} = 109 m ; D_{ch} = 3,60 m ; η_{coll} = 0,60 ; γ = 2/3 ; η_{tg} = 0,72 ($\gamma\eta_{tg}$ = 0,48) ; D = 91,0 m (deuxième article) ; redresseur triphasé raccordé au bus
Volant et G2	Jante carbone/époxy de 360/270 mm, 24 000 à 36 000 tr/min ; machine synchrone à p = 2, λ_{pm} = 0,020 Wb ; variateur à MLI vectorielle (η_{var} = 0,97) ; J = 11,8 kg.m^2 et P_n = 5,5 kW (deuxième article)

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

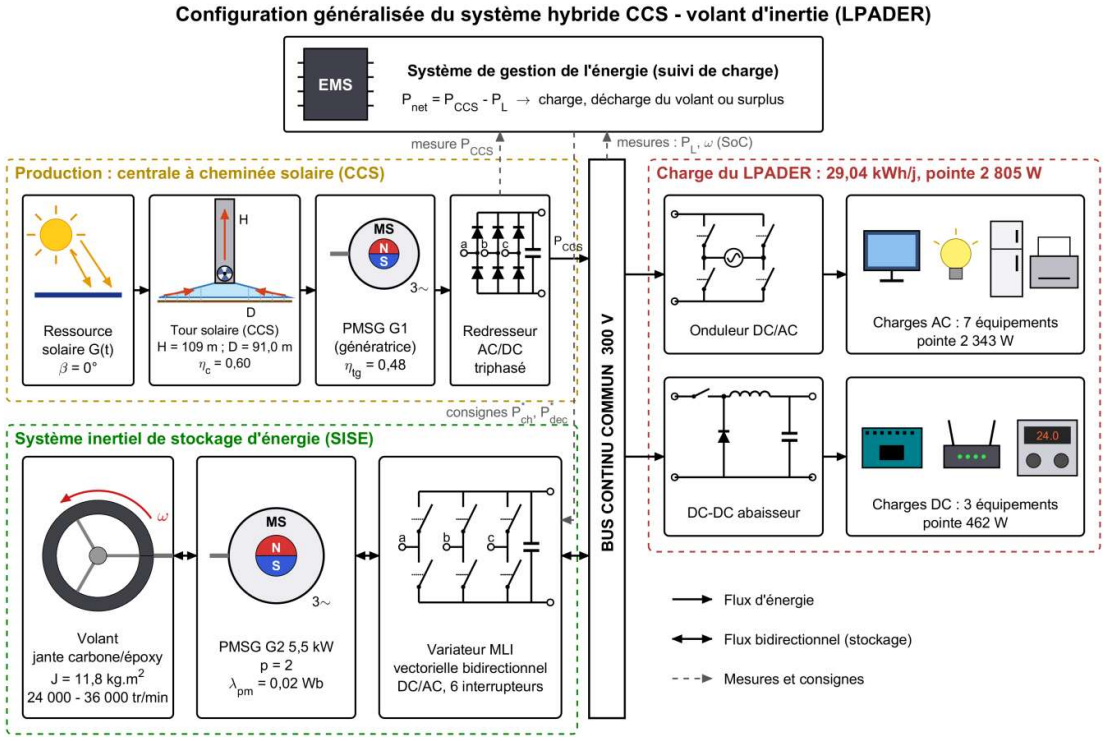


Fig. 1. Schéma généralisé de la configuration du système hybride CCS–volant d'inertie et schéma de principe de chaque sous-système : flux d'énergie, mesures et consignes (les valeurs de dimensionnement indiquées sont issues du deuxième article)

B. Méthodes

Chaque sous-système est décrit ci-dessous par son modèle mathématique ; les critères qui valident ces modèles sont réunis en II-C (Tableau 4). Les simulations supposent l'absence d'ombrage partiel et des paramètres invariants ; la température ambiante suit le profil horaire ; elles sont simulées par le script MATLAB.

1. Modèle du rayonnement solaire

Le modèle simule une journée type par mois, en heure légale convertie en temps solaire vrai par la longitude et l'équation du temps (−4,70 min en janvier, +20,23 min en octobre), au pas de 60 s (1 s pour les journées types de janvier et d'octobre). L'indice de clarté mensuel K_T est déduit de la fraction d'insolation σ par la relation d'Ångström–Prescott [9], [10], sous la forme proposée par Glover et McCulloch pour les régions tropicales [11], et l'irradiation horizontale journalière H s'en déduit à partir de l'irradiation extraterrestre H_0 :

$$\sigma = \frac{n}{N}, \quad K_T = a + b\sigma, \quad H = K_T H_0 \tag{1}$$

où n est la durée d'insolation mesurée, N la durée astronomique du jour, et a = 0,29 cos φ = 0,279 et b = 0,52 les coefficients de Glover et McCulloch [11], φ étant la latitude du site inférieure à 60°. L'irradiation extraterrestre (en Wh·m⁻²) dépend du numéro du jour , de la déclinaison , de la latitude et de l'angle horaire du coucher du soleil, avec = 1 353 W·m⁻² [22] :

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

$$H_0 = \frac{24}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 n_j}{365} \right) \right] \left(\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin\varphi \sin\delta \right) \quad (2)$$

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n_j}{365} \right), \quad \cos\omega_s = -\tan\varphi \tan\delta, \quad N = \frac{2\omega_s}{15}$$

À Mahajanga, l'angle horaire ω_s varie de 83,1° (juin) à 96,9° (décembre). La fraction diffuse journalière, H_d désignant l'irradiation diffuse, suit la corrélation mensuelle de Collares-Pereira et Rabl [12], qui dépend de l'indice de clarté et de l'angle horaire du coucher du soleil (angles en degrés) :

$$\frac{H_d}{H} = 0,775 + 0,00653(\omega_s - 90) - \left[0,505 + 0,00455(\omega_s - 90) \right] \cos(115 K_T - 103) \quad (3)$$

La répartition horaire suit Liu et Jordan [8] pour le diffus et Collares-Pereira et Rabl pour le global [12], [22] :

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180}\cos\omega_s}, \quad r_t = r_d \left(a_t + b_t \cos\omega \right) \quad (4)$$

$$I = r_t H, \quad I_d = r_d H_d, \quad I_b = I - I_d$$

où ω est l'angle horaire, $a_t = 0,409 + 0,5016 \sin\left(\omega_s - 60^\circ\right)$ et $b_t = 0,6609 - 0,4767 \sin\left(\omega_s - 60^\circ\right)$; r_d et r_t sont les fractions horaires de l'irradiation journalière, qui donnent les éclairements horizontaux global I, diffus I_d et direct I_b. Le profil de Liu et Jordan s'intègre exactement à 1 ; celui de Collares-Pereira et Rabl est renormalisé, de sorte que les deux profils redonnent exactement H et H_d (l'intégrale brute de r_t vaut 0,993 en janvier et 0,992 en octobre). Le collecteur étant horizontal (β = 0), le facteur géométrique R_b vaut 1 et la composante réfléchie par le sol s'annule : le collecteur reçoit $G = G_b + G_d$, dont la composante directe dépend de l'angle zénithal θ_z, φ étant la latitude, δ la déclinaison et ω l'angle horaire [22] :

$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega \quad (5)$$

La température ambiante suit un profil en cosinus entre les moyennes mensuelles 2010–2024 des minimales T_{min} et des maximales T_{max}, le maximum étant atteint à 12 h 48 et le minimum à 0 h 48 en temps solaire vrai (t en heures) :

$$T_{amb}(t) = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cos\left[\frac{2\pi(t - 12,8)}{24} \right] \quad (6)$$

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

2. Modèle de la charge du laboratoire

TABLEAU 2 : ÉQUIPEMENTS DE LA CHARGE ET SOMME DES PUISSANCES ET DES ÉNERGIES

Équipement	**Type**	**P unit. (W)**	**Qté**	**P totale (W)**	**Durée (h.j^{-1})**	**Énergie (Wh.j^{-1})**
Machine de séchage	AC	396	1	396	7	2 772
Ordinateur	AC	110	8	880	12	10 560
Ventilateur plafond	AC	77	4	308	12	3 696
Éclairage néon/LED	AC	44	6	264	14	3 696
Mini-réfrigérateur	AC	110	1	110	10	1 100
Imprimante	AC	137,5	2	275	8	2 200
Petites charges diverses	AC	110	1	110	6	660
Alimentations banc labo	DC	176	2	352	8	2 816
Capteurs / Arduino	DC	11	7	77	14	1 078
Routeur / Switch	DC	33	1	33	14	462
Sous-total AC				**2 343**		**24 684**
Sous-total DC				**462**		**4 356**
Total				**2 805 (pointe)**		**29 040**

La charge est un profil en créneaux identique toute l'année, reconstruit équipement par équipement (Tableau 2) à partir de la puissance unitaire $P_{u,i}$, du nombre d'unités N_i, de la durée de fonctionnement t_i et de l'indicateur de service $\mathbf{1}_i(t)$ (égal à 1 pendant les créneaux de fonctionnement) :

$$P_L(t) = \sum_i P_{u,i} N_i \mathbf{1}_i(t), \quad E_L = \int_0^{24\,\mathrm{h}} P_L dt = \sum_i P_{u,i} N_i t_i \tag{7}$$

Chaque équipement appelle une puissance constante sur des créneaux fixes ; le profil est établi au pas de 15 min, nul de 22 h à 8 h, puis ramené au pas de 1 s par une interpolation cubique monotone, qui ne crée pas de dépassement.

3. Modèle de la centrale à cheminée solaire

La CCS est décrite en régime quasi-stationnaire [3], [4], [5] : air parfait, seul apport de chaleur issu du rayonnement absorbé, cheminée adiabatique et sans frottement. La puissance utile transmise à l'air est $Q_u = \eta_{\mathrm{coll}} A_{\mathrm{coll}} G_T$, avec η_{coll} = 0,60 et $G_T = I$. La pression de tirage Δp_{tot} se répartit entre la chute de pression exploitée par la turbine, $\Delta p_s = \gamma \Delta p_{\mathrm{tot}}$, et la pression dynamique ; la puissance est maximale pour γ = 2/3 [4], [5]. Le rendement de la cheminée et la puissance électrique sont [4], [23] :

$$\eta_{\mathrm{cm}} = \frac{g H_{\mathrm{ch}}}{c_p T_{\mathrm{amb}}}, \quad P_{\mathrm{CCS}} = \gamma \eta_{\mathrm{tg}} \eta_{\mathrm{cm}} \eta_{\mathrm{coll}} A_{\mathrm{coll}} G_T, \quad P_{\mathrm{CCS,bus}} = \eta_{\mathrm{AC/DC}} \eta_{\mathrm{bus}} P_{\mathrm{CCS}} \tag{8}$$

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

Le rendement de la cheminée ne dépend que de sa hauteur H_{ch} et de la température ambiante (6) [4], [23] ; η_{tg} = 0,72 regroupe pales, transmission et génératrice G1, si bien que le produit $\gamma\eta_{tg}$ vaut 0,48 ; $\eta_{AC/DC}$ = 0,96 et η_{bus} = 0,98 sont les rendements du redresseur et du raccordement au bus. À vide, toute la différence de pression accélère l'air (relation de Torricelli) ; avec le bilan du collecteur $Q_u = \rho_0 A_{ch} u c_p \Delta T$, la vitesse u_0 et l'échauffement ΔT_0 de l'air à l'entrée de la cheminée sont :

$$u_0 = \left(\frac{2 g H_{ch} \eta_{coll} A_{coll} G_T}{T_{amb} \rho_0 A_{ch} c_p} \right)^{1/3}, \quad \Delta T_0 = \frac{\eta_{coll} A_{coll} G_T}{\rho_0 A_{ch} u_0 c_p}, \quad \frac{\rho_0 u_0^2}{2} = \Delta p_{tot} \tag{9}$$

En charge, la turbine prélève $\Delta p_s = \gamma \Delta p_{tot}$ et seul le tiers restant accélère l'air. La puissance reçue par l'air étant fixée, la vitesse baisse d'un facteur $3^{1/3}$ et l'échauffement augmente d'autant :

$$\Delta p_{tot} = \frac{\rho_0 g H_{ch} \Delta T}{T_{amb}}, \quad u = \frac{u_0}{3^{1/3}}, \quad \Delta T = 3^{1/3} \Delta T_0, \quad P_{CCS} = \eta_{tg} \Delta p_s u A_{ch} \tag{10}$$

Le produit $u\Delta T$ étant invariant, (10) redonne exactement (8) : la puissance ne dépend pas de la vitesse retenue, et le plancher de vitesse imposé par le vent (4 m.s^{-1}) ne modifie que l'échauffement. Le bilan thermique du collecteur avec coefficients d'absorption et de pertes n'est pas utilisé faute de coefficients renseignés : η_{coll} est constant.

4. Modèle du volant d'inertie

Le volant est une jante cylindrique creuse en carbone/époxy, de rayons extérieur r_e et intérieur r_i, de masse m et de masse volumique ρ, tournant à la vitesse angulaire Ω. Son moment d'inertie, son énergie utile entre Ω_{min} et Ω_{max} et son état de charge sont [6], [7], [16] :

$$J = \frac{1}{2} m \left(r_e^2 + r_i^2 \right), \quad E_u = \frac{1}{2} J \left(\Omega_{max}^2 - \Omega_{min}^2 \right), \quad \mathrm{SOC}_{FW} = \frac{E - E_{min}}{E_u} \tag{11}$$

L'énergie cinétique $E = J\Omega^2/2$ suit le bilan de puissance du rotor, avec des pertes fer fonction de la fréquence électrique $f_e = p\Omega/(2\pi)$ et des pertes mécaniques (k_h = 5·10^{-3} W/Hz, k_e = 6,25·10^{-6} W/Hz², P_{m0} = 6 W, P_{m1} = 3 W) [16], [24] :

$$\frac{dE}{dt} = P_{em} - P_{fe} - P_{méc}, \quad P_{fe} = k_h f_e + k_e f_e^2, \quad P_{méc} = P_{m0} + P_{m1} \frac{\Omega - \Omega_{min}}{\Omega_{max} - \Omega_{min}} \tag{12}$$

La tenue de la jante est estimée par la contrainte circonférentielle d'anneau mince et, la jante étant épaisse (r_i / r_e = 0,75), par la contrainte radiale maximale d'un disque annulaire isotrope de coefficient de Poisson ν = 0,30 [6], [15] ; le coefficient de sécurité visé est de 3 :

$$\sigma_\theta = \rho \left(\Omega_{max} r_e \right)^2, \quad \sigma_{r,max} = \frac{3+\nu}{8} \rho \Omega_{max}^2 \left(r_e - r_i \right)^2, \quad \mathrm{FS} = \frac{\sigma_{rupture}}{\sigma_\theta} \tag{13}$$

5. Modèle de la machine synchrone et du variateur

Les équations de la machine G2 sont posées dans le repère de Park lié au rotor [25], [26], avec $\omega_e = p\Omega$ la pulsation électrique, p le nombre de paires de pôles, λ_{pm} le flux des aimants, L_d et L_q les inductances d'axes d et q et R_{st} la résistance statorique :

$$v_d = R_{st} i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \tag{14}$$

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

$$v_q = R_{st} i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \left(L_d i_d + \lambda_{pm} \right) \tag{15}$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \left[\lambda_{pm} i_q + \left(L_d - L_q \right) i_d i_q \right] \tag{16}$$

Avec une commande à $i_d = 0$, tout le courant produit du couple. Le couple devient proportionnel au courant d'axe q, d'où les pertes cuivre ; la puissance échangée avec le bus, comptée positivement en charge, intègre le rendement constant η_{var} du variateur, $P_{em} = T_{em}\Omega$ étant la puissance électromagnétique :

$$T_{em} = K_t i_q, \quad K_t = \frac{3}{2} p \lambda_{pm}, \quad P_{cu} = \frac{3}{2} R_{st} i_q^2 \tag{17}$$

$$P_{FW,bus} = \begin{cases} \dfrac{P_{em} + P_{cu}}{\eta_{var}} & \text{si } P_{em} \geq 0 \text{ (charge)} \\ \eta_{var} \left(P_{em} + P_{cu} \right) & \text{si } P_{em} < 0 \text{ (décharge)} \end{cases} \tag{18}$$

Ce modèle reste simplifié. Il suppose un régime équilibré, sans dynamique électrique, avec des courants et des f.é.m. sinusoïdaux déphasés de 120°, sans harmoniques ni ondulation de commutation. Pour que le variateur garde la maîtrise de la machine jusqu'à Ω_{max}, la tension du bus doit dépasser la f.é.m. composée crête E_{LL} (critère V9), et l'indice de modulation m doit rester dans le domaine linéaire de la MLI vectorielle (critère V10) [18] :

$$V_{dc} > E_{LL} = \sqrt{3}\, p \Omega_{max} \lambda_{pm} \tag{19}$$

$$m = \frac{E_{LL}}{V_{dc}} = \frac{\sqrt{3}\, p \Omega_{max} \lambda_{pm}}{V_{dc}} \leq 1 \tag{20}$$

Comme ces deux conditions ne font intervenir que p, λ_{pm}, Ω_{max} et V_{dc}, on peut les vérifier sans connaître la puissance nominale de la machine. La génératrice G1, elle, n'est représentée que par le rendement η_{tg} de la chaîne turbine-génératrice. Son dimensionnement électrique sort du cadre de cette étude.

6. Tension du bus continu

C'est la machine synchrone du volant qui fixe la tension du bus (Fig. 1). Pour la commander jusqu'à 36 000 tr. min⁻¹, il faut que le bus dépasse la f.é.m. composée de crête.

$$E_{LL} = \sqrt{3}\, p \Omega_{max} \lambda_{pm} = \sqrt{3} \times 2 \times 3770 \times 0{,}020 \approx 261 \text{ V} \tag{21}$$

Nous avons choisi V_{dc} = 300 V, ce qui laisse une marge d'environ 15 % sur E_{LL} (indice de modulation de 0,87). Cette tension doit aussi convenir aux autres convertisseurs raccordés au bus, dont le Tableau 3 (II-B.7) réunit les plages. La fenêtre admise sur le bus va de 270 à 330 V, soit 300 V ± 10 %. Sa borne basse est imposée par G2, dont la f.é.m. composée crête atteint 261 V à 36 000 tr·min⁻¹ et 268 V au seuil de survitesse de 37 000 tr·min⁻¹ : en dessous de 270 V, le variateur perdrait la maîtrise de la machine à haute vitesse. Sa borne haute, 330 V, est celle de la protection contre les surtensions ; avec des semi-conducteurs de la classe 600 V et des condensateurs de bus de 450 V, elle garde une marge d'au moins 35 %.

La génératrice G1 se raccorde au bus par un redresseur. Si ce redresseur est actif (à MLI), le bus doit rester au-dessus de la tension composée crête de G1 : avec la borne basse de 270 V, la tension composée de G1 ne doit pas dépasser 190 V efficaces. Son niveau exact et la commande du redresseur sortent du cadre de cette étude. Un bus plus haut réduirait les courants, mais un

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

bus plus bas rendrait G2 incommandable à pleine vitesse. Enfin, la tension crête d'un réseau de 230 V (325 V) dépasse celle du bus : l'onduleur des charges alternatives, que nous ne modélisons pas, doit comporter un étage élévateur ou un transformateur.

7. Modèle de la gestion de l'énergie

Le système de gestion de l'énergie (EMS) partage à chaque instant la puissance nette entre la charge et le volant, d'après les mesures de production, de consommation et de vitesse du volant. La puissance nette et le bilan du bus s'écrivent :

$$P_{\text{net}} = P_{\text{CCS,bus}} - P_{\text{L}}, \quad P_{\text{CCS,bus}} = P_{\text{L}} + P_{\text{FW,bus}} + P_{\text{sur}} - P_{\text{déf}} \tag{22}$$

où $P_{CCS,bus}$ est la puissance livrée au bus par la tour (8), $P_{FW,bus}$ la puissance échangée par le volant (18), comptée positivement en charge, P_{sur} le surplus non stocké et $P_{déf}$ le déficit non couvert. Un excédent ($P_{net} > 0$) va au volant jusqu'à sa vitesse maximale, le reste formant le surplus ; un déficit est couvert par le volant jusqu'à sa vitesse minimale, dans la limite du couple nominal de G2 [7]. Elle se traduit par cinq règles univoques, appliquées dans cet ordre à chaque pas de temps $\Delta t = 1$ s (Fig. 2) :

R1 – Signe de la puissance nette. Le signe de P_{net} fixe le mode : excédent si $P_{net} > 0$, déficit si $P_{net} < 0$, repos du volant si $P_{net} = 0$. Le volant ne peut pas se charger et se décharger pendant le même pas.

R2 – Excédent. Le volant reçoit $P_{FW} = \min(P_{net} ; P_{FW,max})$, où $P_{FW,max}$ est bornée par le couple nominal de G2 (T_n ω) et par l'énergie qui reste à stocker avant N_{max} (18).

R3 – Déficit. Le volant fournit $\min(|P_{net}| ; P_{FW,max})$ tant que sa vitesse dépasse N_{min}, avec un couple au plus égal à T_n (18).

R4 – Surplus et déficit. Ce que le volant ne peut ni prendre ni fournir, parce qu'il atteint une limite pendant le pas de temps, forme le surplus P_{sur}, écrêté par la commande de G1, ou le déficit $P_{déf}$, compté comme énergie non servie ; le délestage qui l'éviterait est traité au troisième article.

R5 – Butées et cas simultanés. À N_{max}, le variateur ne prélève plus sur le bus que les pertes à vide P_0 (12), qui maintiennent la vitesse ; à N_{min}, il est bloqué et le volant ne ralentit plus que sous l'effet de ses pertes à vide. Si deux limites sont atteintes en même temps (couple nominal et vitesse maximale, par exemple), la plus contraignante s'applique, et l'écart passe au surplus ou au déficit. La gestion ne fait ni prévision ni hystérésis : chaque pas ne dépend que des mesures et de l'état du volant au pas courant.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

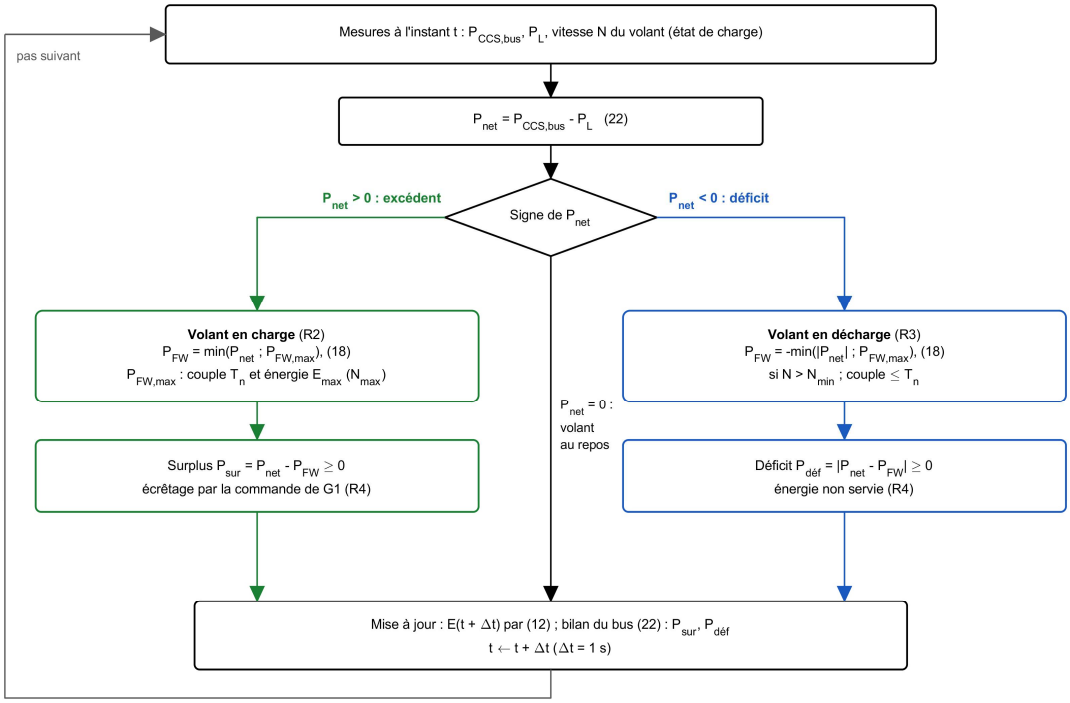


Fig. 2. Organigramme de la gestion de l'énergie appliquée à chaque pas de temps (Δt = 1 s) : signe de la puissance nette (R1), charge ou décharge du volant dans ses limites (R2, R3), surplus ou déficit (R4), mise à jour de l'énergie du volant et bilan du bus

Le Tableau 3 rassemble les seuils et les limites qu'utilisent ces règles, ainsi que la régulation du bus, les protections et les conditions de démarrage et d'arrêt des convertisseurs. Les limites de couple, de courant et de vitesse sont appliquées dans la simulation ; la régulation de la tension et les protections ne le sont pas, le bus étant supposé idéal, à tension constante et en équilibre instantané (22).

TABLEAU 3 : SEUILS, LIMITES, PROTECTIONS ET CONDITIONS DE MARCHE DE LA GESTION DE L'ÉNERGIE ET DU BUS CONTINU (V_{dc} = 300 V)

Organe	Grandeur	Seuil ou limite	Action ou transition
Bus continu	Tension nominale ; bande normale	300 V ; 294 à 306 V	régulation de la tension par le variateur de G2
Bus continu	Écrêtage	> 306 V	réduction de la puissance de G1 par sa commande, puis hacheur de freinage du bus
Bus continu	Délestage	< 294 V	délestage des charges (troisième article)
Bus continu	Surtension ; sous-tension	330 V ; 270 V	arrêt du redresseur de G1 et freinage ; arrêt de l'onduleur et du variateur
Volant et G2	Vitesse de la jante	N_{min} = 24 000 ; N_{max} = 36 000 tr·min⁻¹	fin de décharge (variateur bloqué) ; fin de charge (pertes à vide seules) (R5)

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

Organe	Grandeur	Seuil ou limite	Action ou transition
Volant et G2	Survitesse	37 000 tr·min⁻¹	freinage sur résistance (coefficient de sécurité de la jante : 3,08)
Volant et G2	Courant d'axe q ; couple	$I_q \leq I_n = 24{,}3$ A ; $T \leq T_n =$ 1,46 N·m	limite $P_{FW,max}$ (R2, R3)
Volant et G2	Indice de modulation	$m \leq 1$ (0,79 à 0,97 de 330 à 270 V)	MLI vectorielle
Variateur de G2	Puissance assignée	5,5 kW (P_n)	pointes simulées : 4,19 kW en charge, 2,71 kW en décharge
Redresseur de G1	Puissance ; tension de G1	6,5 kW (octobre) ; ≤ 190 V efficaces entre phases	écrêtage au-dessus de 306 V
Mise en service	Précharge ; lancement du volant	bus à 294 V par G1, de jour ; 0 à 24 000 tr·min⁻¹ (10,35 kWh)	précharge par le redresseur de G1 à travers une résistance, puis lancement du volant sur l'excédent de la tour

En pratique, le variateur de G2 est le seul convertisseur qui puisse tenir la tension du bus, en absorbant comme en fournissant de la puissance. Dans la bande normale, de 294 à 306 V (300 V ± 2 %), sa boucle de tension fournit la consigne de courant d'axe q, bornée à I_n. Quand le volant atteint une butée en charge (N_{max} ou I_n), la tension monte : au-dessus de 306 V, la commande de G1 réduit la puissance de la turbine, et un hacheur de freinage dissipe le reste si besoin. Quand il atteint une butée en décharge (N_{min} ou I_n), la tension baisse : au-dessous de 294 V, les charges sont délestées. En régime quasi statique, ce fonctionnement donne la même répartition que la règle simulée ; sa dynamique (stabilité des boucles, capacité du bus) reste à étudier.

La mise en service ne peut se faire que de jour, puisque seule la tour peut alimenter le bus : précharge du bus par le redresseur de G1, à travers une résistance, jusqu'à 294 V ; lancement du volant en moteur jusqu'à N_{min}, qui demande 10,35 kWh pour J = 11,8 kg·m², soit l'excédent de deux journées de janvier (4,63 kWh·j⁻¹) ou d'une journée d'octobre ; puis raccordement des charges. Si le volant redescend à N_{min} la nuit, la charge n'est plus servie avant le retour du soleil. Les protections isolent l'organe en cause : surtension du bus à 330 V (arrêt du redresseur de G1 et freinage), sous-tension à 270 V (arrêt de l'onduleur et du variateur), survitesse du volant à 37 000 tr·min⁻¹ (freinage sur résistance, la jante gardant un coefficient de sécurité de 3,08).

Les bilans d'énergie se vérifient à deux niveaux sur chaque journée simulée. Pour le bus, $E_{CCS,bus} = E_L + \Delta E_{FW} + E_{sur} - E_{déf}$, où ΔE_{FW} est l'énergie absorbée moins l'énergie restituée par le volant. Pour le volant, ΔE_{FW} égale la somme des pertes du variateur (18), des pertes cuivre (17), des pertes à vide (12) et de la variation d'énergie cinétique. Les résidus de ces deux bilans figurent au Tableau 8 (III-D). Le troisième article évalue cette gestion ; le présent article vérifie que chaque organe peut tenir le rôle qu'elle lui attribue, puis l'applique au couplage de la tour et du volant (III-D).

C. Validation des modèles

Pour chacun des onze critères V1 à V11, le Tableau 4 précise la grandeur contrôlée, le modèle concerné et le seuil d'acceptation ; le Tableau 9 (III-E) donne le résultat obtenu. Ici, « vérifié » signifie vérifié numériquement ou cohérent avec la théorie ; il ne s'agit pas d'une validation expérimentale.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

TABLEAU 4 : CRITÈRES DE VALIDATION DES MODÈLES ET DE LA CONFIGURATION

N°	Critère (grandeur contrôlée)	Modèle concerné	Seuil d'acceptation
V1	Énergie journalière de la charge	Charge, éq. (7)	29,04 kWh
V2	Cohérence du gisement horizontal	Rayonnement, éq. (1) à (3)	$0 < K_T < 1$; $G = G_b + G_d$
V3	Répartition horaire de l'irradiation	Rayonnement, éq. (4) et (5)	$\int G\,dt = H$ et $\int G_d\,dt = H_d$ à 0,1 % près ; $G = 0$ la nuit
V4	Proportionnalité de la puissance à l'éclairement	Tour, éq. (8)	$P_{CCS} = k\,G$, écart ≤ 0,1 %
V5	Vitesse de l'air à vide (relation de Torricelli)	Tour, éq. (9)	écart ≤ 1 %
V6	Échauffement et vitesse de l'air de Manzanares	Tour, éq. (9) [3], [13]	écart ≤ 10 %
V7	Rendement global (borne de Schlaich)	Tour, éq. (8) [5]	$\eta_{CCS} \leq 0{,}101$ %
V8	Puissance électrique de Manzanares	Tour, éq. (8) [3], [13]	≈ 50 kW (± 30 %)
V9	Tension du bus et f.é.m. composée crête de G2	Machine G2, éq. (19) et (21)	$V_{dc} \geq E_{LL}$
V10	Indice de modulation du variateur	Variateur, éq. (20)	$m \leq 1$
V11	Coefficient de sécurité de la jante	Volant, éq. (13)	≥ 3

III.RÉSULTATS

A. Gisement solaire

Les simulations portent sur janvier (jour représentatif nj = 17) et sur octobre (nj = 288), dans l'année moyenne. Le soleil culmine 5,2° au sud du zénith en janvier et 6,1° au nord en octobre ; il se lève à 5 h 40, passe au méridien à 12 h 05 et se couche à 18 h 29 en janvier, contre 5 h 29, 11 h 40 et 17 h 51 en octobre (heure légale).

Avec l'insolation moyenne de janvier (5,46 $h.j^{-1}$), l'indice de clarté ne vaut que 0,501 et la fraction diffuse atteint 44 % ; en octobre (10,47 $h.j^{-1}$), il monte à 0,720 et la fraction diffuse tombe à 31 % (Fig. 3b). Sur le collecteur horizontal, l'irradiation journalière vaut 5,64 $kWh.m^{-2}$ en janvier et 7,66 $kWh.m^{-2}$ en octobre, dont la composante directe fournit 56 et 69 %. Au midi solaire, l'éclairement global atteint 760 $W{\cdot}m^{-2}$ en janvier et 1 065 $W{\cdot}m^{-2}$ en octobre, et l'éclairement direct plafonne à 453 et 765 $W{\cdot}m^{-2}$ (Fig. 4a et b). Les composantes se réfèrent à la précision numérique près (V2), et les profils horaires redonnent exactement H et H_d (V3).

Sur l'année (Fig. 3), l'irradiation extraterrestre H_0 varie de 7,26 $kWh{\cdot}m^{-2}$ (juin) à 11,28 $kWh{\cdot}m^{-2}$ (décembre), et l'indice de clarté varie de 0,50 (janvier) à 0,72 (octobre) ; la fraction diffuse évolue en sens inverse, de 44 % en janvier à 30 % en mai et en juin (Fig. 3b). Le gisement journalier du collecteur va de 4,88 $kWh.m^{-2}$ (juin) à 7,66 $kWh.m^{-2}$ (octobre) en année moyenne, soit 6,12 $kWh.m^{-2}$ par jour et 2 233 $kWh.m^{-2}$ par an, et de 4,32 $kWh.m^{-2}$ (juillet) à 7,36 $kWh.m^{-2}$ (octobre) dans l'année la plus défavorable,

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

formée du minimum de chaque mois (Fig. 3 a et c). La composante directe en fournit 56 % en janvier et près de 70 % d'avril à octobre. Avec la température horaire du mois, la tour produit de 32,00 kWh par jour (juin) à 49,90 kWh (octobre), soit 39,97 kWh en moyenne et 14 589 kWh par an ; dans l'année la plus défavorable, sa production descend à 28,34 kWh par jour en juillet (Fig. 3c). Le minimum du collecteur horizontal tombe donc en hiver austral, quand le soleil est bas, et non en janvier, où la nébulosité de la saison des pluies est compensée par un soleil proche du zénith. Octobre, à la fin de la saison sèche, reste le mois le plus favorable, avec 1,57 fois le gisement de juin.

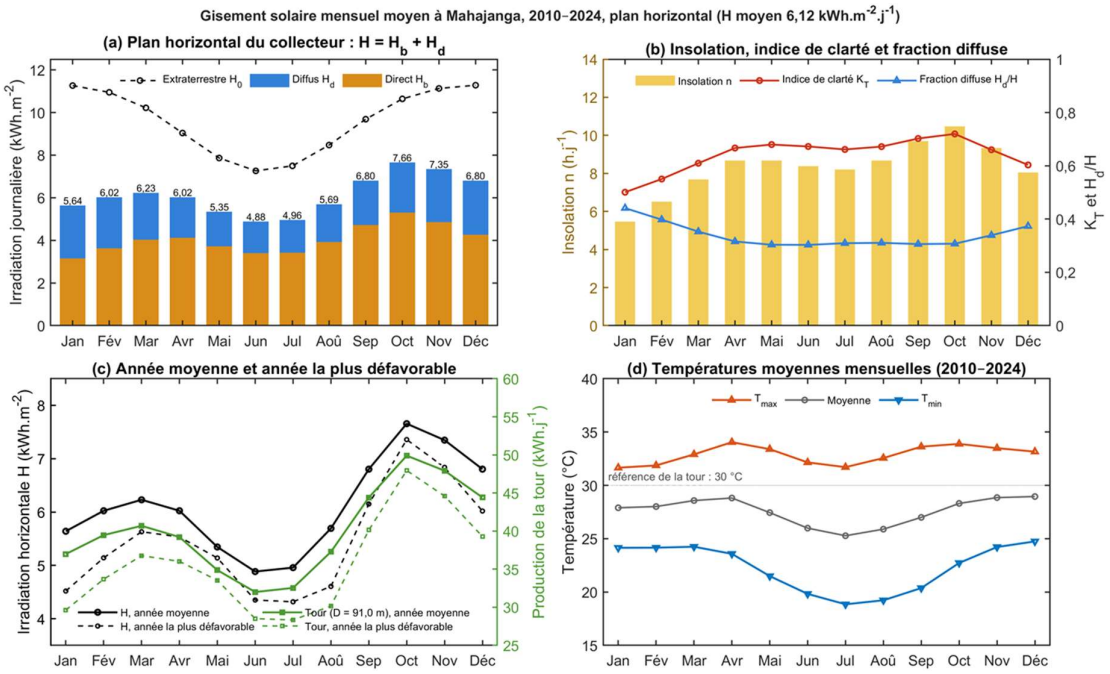


Fig. 3. Gisement solaire mensuel moyen à Mahajanga sur le plan horizontal du collecteur (ASECNA 2010–2024 ; Ångström–Prescott selon Glover et McCulloch, Collares-Pereira et Rabl, Liu et Jordan) : (a) irradiation journalière directe et diffuse et irradiation extraterrestre, (b) insolation, indice de clarté et fraction diffuse, (c) année moyenne et année la plus défavorable, avec la production de la tour (D = 91,0 m), (d) températures moyennes mensuelles

Les deux journées types (Fig. 4) donnent des cloches d'éclairement presque symétriques autour du midi solaire, sans passage nuageux (Fig. 4 a et b) ; le cosinus de l'angle zénithal approche 1 à midi (0,996 en janvier, 0,994 en octobre), le soleil passant alors près du zénith (Fig. 4 c). La température ambiante varie de 24,1 à 31,7 °C en janvier et de 22,7 à 33,9 °C en octobre (Fig. 4 d). Elle n'agit sur la tour que par le rendement de la cheminée, et faiblement : à l'heure de l'éclairement maximal, l'air ambiant atteint 31,6 °C en janvier et 33,8 °C en octobre, et la production journalière ne baisse que de 0,3 et 0,9 % par rapport à celle calculée à 30 °C.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

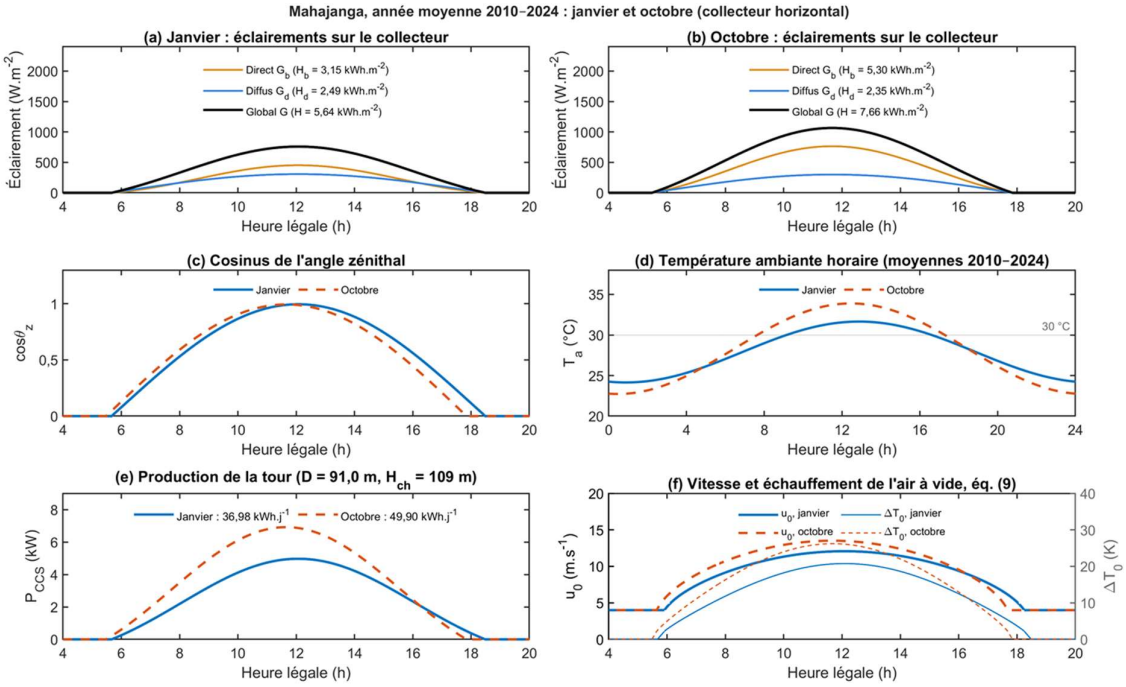


Fig. 4. Janvier (mois de plus faible insolation) et octobre (mois le plus favorable), année moyenne 2010–2024 (Glover et McCulloch, Liu et Jordan, Collares-Pereira et Rabl) : (a, b) composantes de l'éclairement sur le collecteur horizontal, (c) cosinus de l'angle zénithal, (d) température ambiante horaire, (e) production de la tour (D = 91,0 m, H_{ch} = 109 m) et (f) vitesse et échauffement de l'air à vide (9)

B. Profil de charge

Sur la journée, l'énergie consommée atteint 29,04 kWh, valeur que l'interpolation au pas d'une seconde conserve (V1).

La puissance installée s'élève à 2 805 W, dont 2 343 W en alternatif et 462 W en continu, pour 29,04 kWh.j^{-1} (Tableau 2 et Fig. 5). L'alternatif représente 85 % de l'énergie. Une fois le soleil couché, entre 18 h et 22 h, le laboratoire consomme encore 6,48 kWh, soit 22 % de l'énergie journalière ; quant à la pointe de 16 h à 18 h, elle coïncide avec le déclin de la production solaire. Au fil de la journée, la charge démarre à 8 h vers 2 000 W, atteint 2 695 W de 9 h à 12 h, retombe à 485 W pendant la pause de midi, puis culmine à 2 805 W de 16 h à 18 h (Fig. 5 a) ; à 18 h, 78 % de l'énergie journalière est déjà consommée (Fig. 5 b).

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

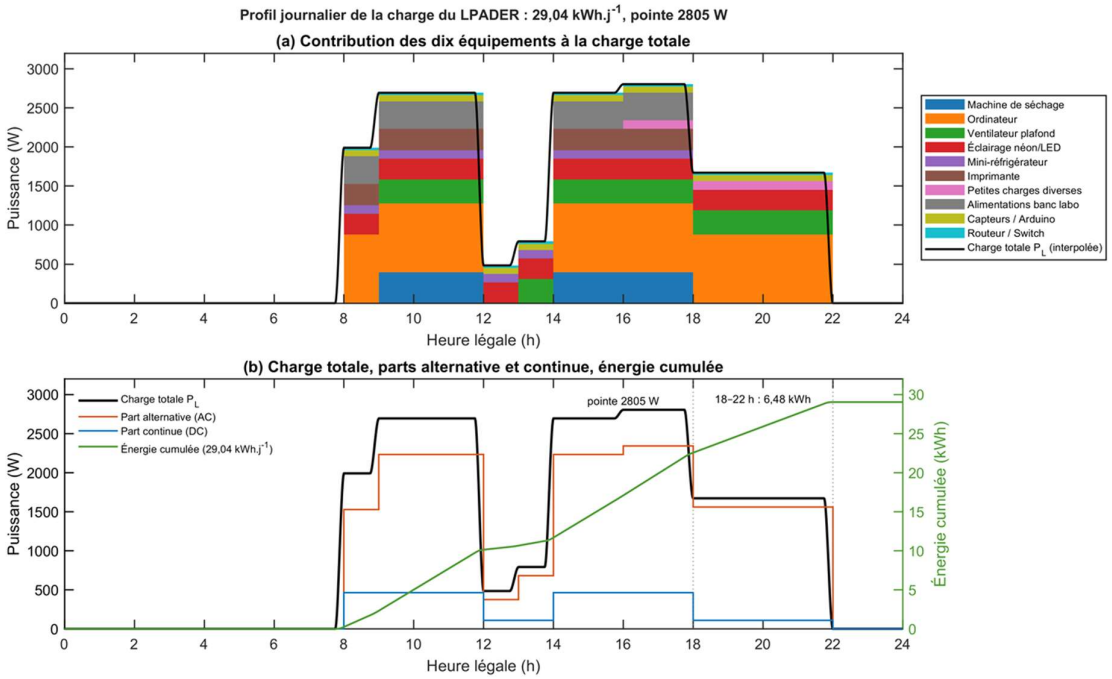


Fig. 5. Profil journalier de la charge du LPADER (29,04 kWh·j⁻¹, pointe de 2 805 W) : (a) contribution des dix équipements du Tableau 2, au pas de 15 min, et charge totale interpolée (7), (b) charge totale, parts alternative et continue, et énergie cumulée

C. Validation des modèles des sous-systèmes

Les modèles sont validés un à un d'après les critères définis en II-C : la tour, puis le volant avec sa machine synchrone.

1. Centrale à cheminée solaire

a) Rendements et caractéristiques de la tour.

Le Tableau 5 rassemble les rendements de la chaîne de conversion. Pour une cheminée de 109 m, le rendement de la cheminée vaut 0,351 % à la température de référence de 30 °C ; combiné au rendement du collecteur (0,60) et à celui de la turbine-génératrice ($\gamma\ \eta_{tg} = 2/3 \times 0{,}72 = 0{,}48$), il donne un rendement global de 0,101 %, égal à la borne de Schlaich (V7) et proche de celui de Manzanares (0,105 %). Pour le collecteur de 91,0 m retenu dans le deuxième article (6 504 m²), la pente théorique de la caractéristique vaut donc $k = \eta_{CCS}\ A_{coll} = 6{,}574$ W.(W.m^{-2})$^{-1}$, et la pente simulée lui est égale à mieux que 0,1 % près (V4) : la puissance de la tour suit bien une droite passant par l'origine (Fig. 6 b). Avec ce collecteur et la température horaire du mois, la tour produit 36,98 kWh par jour en janvier et 49,90 kWh en octobre, soit 1,35 fois plus, avec des pointes de 4 970 et 6 918 W (Fig. 4 e).

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

TABLEAU 5 : RENDEMENTS ET GRANDEURS CARACTÉRISTIQUES DE LA TOUR (H_{ch} = 109 m)

Grandeur	**Expression**	**Valeur**
Rendement du collecteur	η_{coll}	0,60
Rendement de la cheminée	$\eta_{cm} = g\, H_{ch}/(c_p\, T_{amb})$	0,351 % (30 °C)
Rendement turbine-génératrice	$\gamma\, \eta_{tg} = (2/3) \times 0{,}72$	0,48
Rendement global simulé	$\eta_{CCS} = \gamma\, \eta_{tg}\, \eta_{cm}\, \eta_{coll}$	0,101 %
Borne de Schlaich	$(2/3)\, \eta_{coll}\, \eta_{cm}\, \eta_{tg}$	0,101 %
Pente théorique (D = 91,0 m)	$k = \eta_{CCS}\, A_{coll}$	6,574 $W.(W.m^{-2})^{-1}$
Pente simulée (D = 91,0 m)	max P_{CCS} / max G	6,574 $W.(W.m^{-2})^{-1}$
Échauffement et vitesse à vide : janvier (760 $W \cdot m^{-2}$) / octobre (1 065 $W \cdot m^{-2}$)	ΔT_0 ; u_0	20,67 K ; 12,07 m.s-1 / 25,89 K ; 13,51 m.s-1
Vitesse de Torricelli	$(2\, g\, H_{ch}\, \Delta T_0 / T_{amb})^{1/2}$	13,51 m.s-1 (octobre)
Production journalière : janvier / octobre	$\int P_{CCS}\, dt$	36,98 / 49,90 kWh

Sous l'éclairement maximal d'octobre (1 065 $W \cdot m^{-2}$), l'air s'échauffe de 25,89 K à vide sous le collecteur et circule à 13,51 $m \cdot s^{-1}$ dans la cheminée ; sous celui de janvier (760 $W \cdot m^{-2}$), ces valeurs tombent à 20,67 K et 12,07 $m \cdot s^{-1}$ (Fig. 4 f). Calculée indépendamment à partir de l'échauffement d'octobre, la relation de Torricelli donne la même vitesse (V5). En charge, la turbine prélève les deux tiers de la différence de pression : à 30 °C, la vitesse tombe à 9,37 $m.s^{-1}$ et l'échauffement monte à 37,34 K, pour la même puissance de 7,00 kW (10). Le plancher de 4 $m \cdot s^{-1}$ n'intervient qu'en dessous de 28 $W \cdot m^{-2}$, au lever et au coucher du soleil (Fig. 6a), et il réduit alors l'échauffement sans toucher à la puissance. Le rendement de la cheminée croît linéairement avec la hauteur (Fig. 6c).

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

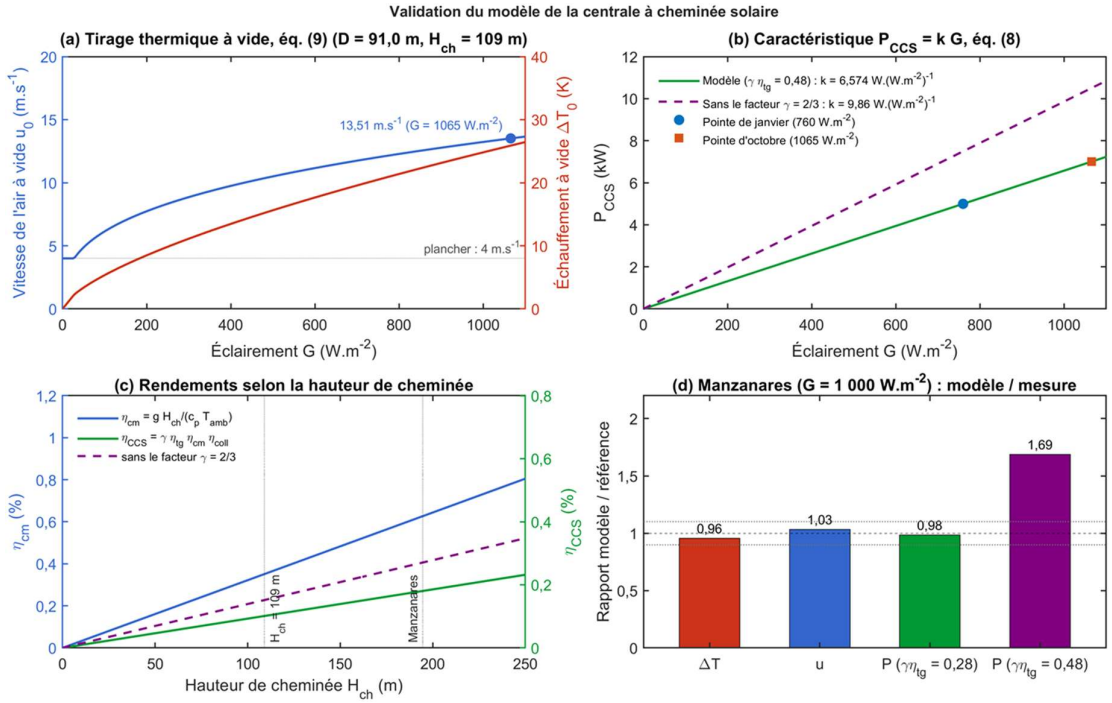


Fig. 6. Validation du modèle de la centrale à cheminée solaire (D = 91,0 m, température de référence de 30 °C) : (a) tirage thermique en fonction de l'éclairement, (b) caractéristique $P_{CCS} = f(G)$ avec et sans le facteur 2/3 de Schlaich, (c) rendements selon la hauteur de cheminée, (d) rapport modèle / référence pour le prototype de Manzanares

b) Cas de référence de Manzanares.

Appliqué au prototype de Manzanares sous 1 000 W·m⁻², le modèle donne un échauffement de 19,1 K et une vitesse de l'air de 15,5 m·s⁻¹, contre environ 20 K et 15 m·s⁻¹ mesurés sans charge, soit des écarts de −4,5 % et +3,4 % (Tableau 6 et Fig. 6 d). Sa partie thermo-aéraulique reproduit donc le comportement du prototype (V6). Pour la puissance, la turbine mono-pale de Manzanares n'a pas le rendement de la turbine G1 du LPADER : avec $\eta_{tg} = 0,42$, soit $\gamma\ \eta_{tg} = 0,28$ au lieu de 0,48 pour la tour, le modèle donne 49,2 kW pour une puissance nominale d'environ 50 kW, soit −1,6 % (V8). Avec le rendement de la turbine G1 ($\gamma\ \eta_{tg} = 0,48$), il donnerait 84,4 kW, soit 1,69 fois la référence.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

TABLEAU 6 : CAS DE RÉFÉRENCE DE MANZANARES (G = 1 000 W.m^{-2}) [3], [13]

Grandeur	**Référence**	**Modèle**	**Écart**
Hauteur / rayon de la cheminée	194,6 m / 5,08 m	idem	–
Diamètre du collecteur	244 m	idem	–
Échauffement de l'air ΔT	≈ 20 K	19,1 K	−4,5 %
Vitesse de l'air sans charge	≈ 15 m.s^{-1}	15,5 m.s^{-1}	+3,4 %
Puissance électrique ($\gamma\ \eta_{tg}$ = 0,28)	≈ 50 kW	49,2 kW	−1,6 %
Puissance avec $\gamma\ \eta_{tg}$ = 0,48 (turbine G1)	≈ 50 kW	84,4 kW	× 1,69

2. Volant d'inertie et machine synchrone

La jante mesure 360 mm de diamètre extérieur et 270 mm de diamètre intérieur ; elle tourne entre 24 000 et 36 000 tr.min^{-1}. À pleine vitesse, sa vitesse périphérique atteint 679 m.s^{-1} et la contrainte tangentielle 737 MPa. Avec une résistance à la rupture de 2 400 MPa, le coefficient de sécurité vaut 3,26, au-dessus du minimum de 3 que nous avons fixé (V11). La contrainte radiale maximale du disque épais (13), de 19,0 MPa, ne représente que 2,6 % de la contrainte circonférentielle. La plage de vitesse entraîne aussi un talon d'énergie : à 24 000 tr.min^{-1}, il reste $(N_{min}/N_{max})^2$ = 44,4 % de l'énergie à pleine vitesse, et seule la fraction complémentaire, 55,6 %, est utilisable.

Côté machine, la constante de couple vaut K_t = 1,5 × 2 × 0,020 = 0,060 N.m.A^{-1}. À 36 000 tr.min^{-1}, la f.é.m. crête simple atteint p $\Omega_{max}\ \lambda_{pm}$ = 2 × 3 770 × 0,020 ≈ 151 V, et la f.é.m. composée $E_{LL} = \sqrt{3} \times 151 \approx 261\ \text{V}$. Le bus de 300 V satisfait donc la condition V9, avec un indice de modulation m = 261/300 = 0,87 (V10). Une MLI sinusoïdale, limitée à (√3/2) V_{dc} ≈ 260 V en tension composée crête, ne suffirait pas : il faut une MLI vectorielle [18].

D. Couplage de la tour et du volant

La tour a ensuite été couplée au volant sur le bus de 300 V, sous la gestion décrite en II-B.7, avec les dimensions retenues au deuxième article : collecteur de 91,0 m, volant de 11,8 kg.m^2 (12,94 kWh utiles entre 24 000 et 36 000 tr.min^{-1}) et machine G2 de 5,5 kW. Conformément à (8) et (22), la tour entre dans le bilan du bus par la puissance qu'elle y livre : $P_{CCS,bus}$ = 0,96 × 0,98 × P_{CCS} vaut 34,79 kWh.j^{-1} en janvier et 46,94 kWh.j^{-1} en octobre, contre 36,98 et 49,90 kWh.j^{-1} en sortie de la turbine-génératrice (III-C.1). La charge est celle du laboratoire, sans marge (29,04 kWh.j^{-1}, pointe de 2 805 W). Chaque journée type est simulée en régime établi : l'énergie du volant revient à sa valeur initiale au bout de 24 h. Le Tableau 7 réunit les bilans journaliers, et la Fig. 7 montre deux journées consécutives de chaque mois.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

TABLEAU 7 : COUPLAGE DE LA TOUR ET DU VOLANT (JOURNÉES TYPES DE JANVIER ET D'OCTOBRE, ANNÉE MOYENNE, CHARGE DU LABORATOIRE DE 29,04 kWh·j⁻¹)

Grandeur	Janvier	Octobre
Production de la tour livrée au bus (kWh.j^{-1})	34,79	46,94
Énergie absorbée / restituée par le volant (kWh.j^{-1})	10,63 / 9,51	11,17 / 10,01
Rendement journalier du volant (%)	89,5	89,6
Pertes du volant, dont pertes à vide (kWh.j^{-1})	1,12 (0,46)	1,17 (0,47)
Énergie fournie par le volant de 18 h à 8 h (kWh.j^{-1})	6,39	6,48
Taux de couverture (%) ; énergie non servie (kWh.j^{-1})	100 ; 0	100 ; 0
Surplus (kWh.j^{-1})	4,63	16,74
État de charge du volant (%)	22,1 à 100	18,2 à 100
Vitesse du volant (tr.min^{-1})	27 108 à 36 000	26 586 à 36 000
Courant maximal de G2 (% du courant nominal)	79,8	64,0
Puissance maximale du volant au bus, charge / décharge (W)	4 191 / 2 248	3 639 / 2 713
Volant plein : à partir de / pendant	12 h 53 / 2,76 h	10 h 52 / 4,96 h

La tour et le volant couvrent entièrement la charge les deux mois : le taux de couverture vaut 100 %, aucune énergie ne manque, et le bilan journalier se ferme. Le volant absorbe 10,63 kWh par jour en janvier et 11,17 kWh en octobre, et en restitue 9,51 et 10,01 kWh, surtout le soir et la nuit : entre 18 h et 8 h, il fournit 6,39 et 6,48 kWh. Son rendement journalier, 89,5 et 89,6 %, tient aux deux passages dans le variateur et aux pertes à vide, qui courent toute la journée (0,46 et 0,47 kWh sur 1,12 et 1,17 kWh de pertes). Le volant atteint sa vitesse maximale à 12 h 53 en janvier et à 10 h 52 en octobre, et y reste 2,76 et 4,96 h ; au plus bas, à l'aube, il garde 22,1 et 18,2 % de son énergie utile (27 108 et 26 586 tr.min^{-1}), au-dessus de sa vitesse minimale.

La machine G2 reste sous son couple nominal : elle appelle au plus 79,8 % de son courant nominal en janvier et 64,0 % en octobre. Le maximum de janvier survient pendant la pause de midi, quand la charge retombe à 485 W alors que le volant n'est pas encore plein : il absorbe alors 4,19 kW (Fig. 7 a). En décharge, le volant fournit au plus 2,25 et 2,71 kW au bus, à la fin de la pointe de 16 h à 18 h. Le surplus, 4,63 kWh par jour en janvier et 16,74 kWh en octobre, montre que le collecteur de 91,0 m est dimensionné pour un mois moins ensoleillé que janvier sur le plan horizontal (III-A et IV-B).

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

Le Tableau 8 détaille les bilans définis en II-B.7. Sur les 34,79 kWh livrés au bus en janvier, 29,04 kWh vont à la charge, 1,12 kWh couvrent les pertes du volant (0,61 kWh dans le variateur, 0,05 kWh par effet Joule dans G2 et 0,46 kWh de pertes à vide) et 4,63 kWh forment le surplus. Les deux mois, le bilan du bus et celui du volant se ferment à moins de 10^{-11} kWh, et l'énergie du volant revient à sa valeur initiale. Les pointes restent sous les valeurs du Tableau 3 : 4,19 kW en charge et 2,71 kW en décharge pour le variateur (5,5 kW), 19,4 A pour le courant d'axe q de G2 (24,3 A) et 6,5 kW pour le redresseur de G1.

TABLEAU 8 : BILANS D'ÉNERGIE JOURNALIERS DU BUS ET DU VOLANT (kWh·j^{-1}, ANNÉE MOYENNE, CHARGE DE 29,04 kWh·j^{-1})

Terme du bilan	Janvier	Octobre
Production de la tour livrée au bus $E_{CCS,bus}$	34,79	46,94
Charge du laboratoire E_L	29,04	29,04
Volant : énergie absorbée ; restituée	10,63 ; 9,51	11,17 ; 10,01
Surplus E_{sur} ; déficit $E_{déf}$	4,63 ; 0	16,74 ; 0
Résidu du bilan du bus	$< 10^{-11}$	$< 10^{-11}$
Volant : pertes du variateur ; cuivre ; à vide	0,613 ; 0,049 ; 0,459	0,645 ; 0,055 ; 0,467
Volant : variation d'énergie ; résidu	0,000 ; $< 10^{-11}$	0,000 ; $< 10^{-11}$
Pointes de puissance : tour au bus ; surplus (W)	4 675 ; 3 871	6 509 ; 5 965

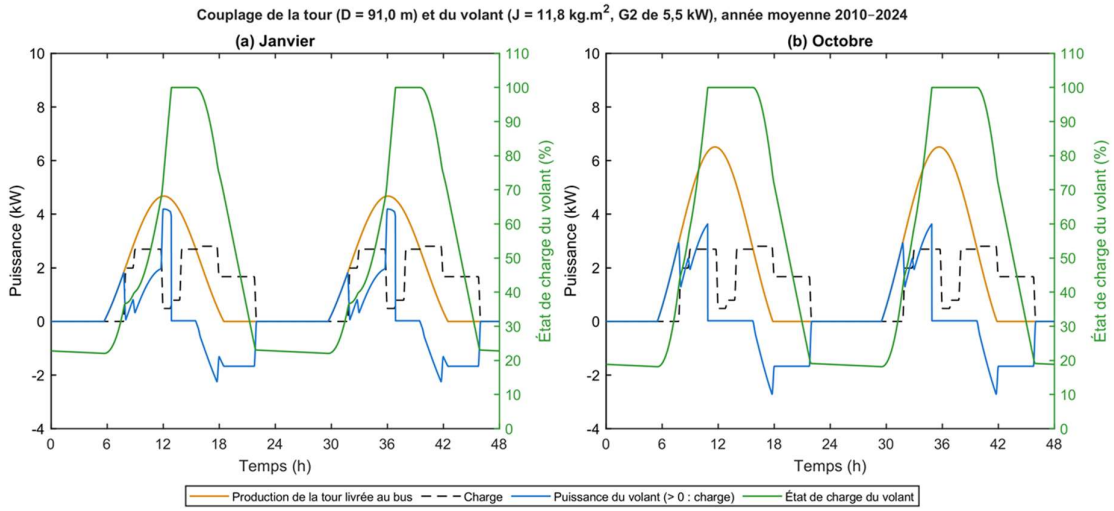


Fig. 7. Couplage de la tour (D = 91,0 m) et du volant (J = 11,8 kg.m^2, G2 de 5,5 kW) sur deux journées types consécutives (année moyenne 2010–2024, charge de 29,04 kWh·j^{-1}) : production de la tour livrée au bus, charge, puissance échangée par le volant (positive en charge) et état de charge du volant, (a) en janvier et (b) en octobre

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 60 No. 1 November 2026, pp. 113-136

E. Synthèse de la validation

Les onze critères sont vérifiés, mais ils n'ont pas tous la même portée. V4, V5 et V7 sont des contrôles de cohérence interne : la proportionnalité de la puissance à l'éclairement (V4) et la relation de Torricelli (V5) sont des propriétés des équations implantées, et la borne de Schlaich (V7) est imposée par le facteur $\gamma = 2/3$ appliqué à η_{tg}. V8 (puissance de Manzanares) n'est obtenu qu'en prenant un rendement de turbine de 0,42 au lieu de 0,72, avec une tolérance de ±30 %. Les autres comparent le modèle à des limites de composants ou à des mesures publiées.

Le Tableau 9 confronte les résultats aux seuils des onze critères du Tableau 4 (II-C) : tous sont vérifiés.

TABLEAU 9 : VÉRIFICATION DES CRITÈRES DE VALIDATION DE LA CONFIGURATION

N°	Critère	Seuil	Résultat
V1	Énergie de la charge après interpolation	29,04 kWh	29,04 kWh (janvier et octobre)
V2	Cohérence du gisement horizontal	$0 < K_T < 1$; $G = G_b + G_d$	K_T = 0,501 / 0,720 ; H_d/H = 0,44 / 0,31 (janvier / octobre)
V3	Répartition horaire de l'irradiation	écart ≤ 0,1 %	écarts < 10^{-14} ; G = 0 la nuit
V4	Proportionnalité $P_{CCS} = k\ G$	écart ≤ 0,1 %	6,574 / 6,574 $W.(W.m^{-2})^{-1}$ (A_{coll} = 6 504 m^2)
V5	Relation de Torricelli	écart ≤ 1 %	13,51 / 13,51 $m.s^{-1}$ (ΔT_0 = 25,89 K, octobre)
V6	Manzanares : ΔT et V	écart ≤ 10 %	19,1 K (−4,5 %) ; 15,5 $m.s^{-1}$ (+3,4 %)
V7	Borne de rendement de Schlaich	$\eta_{CCS} \leq 0{,}101$ %	0,101 %
V8	Manzanares : puissance	≈ 50 kW (± 30 %)	49,2 kW (−1,6 %)
V9	Tension du bus / f.é.m. composée crête de G2	$V_{dc} \geq E_{LL}$	300 V ≥ 261 V
V10	Indice de modulation du variateur	m ≤ 1	0,87
V11	Coefficient de sécurité de la jante	≥ 3	3,26

IV.DISCUSSION

A. Fiabilité des modèles et borne de Schlaich

La validation distingue nettement les deux parties du modèle de la tour. La partie thermo-aéraulique, qui fixe l'échauffement et la vitesse de l'air, s'accorde à moins de 5 % près avec la relation de Torricelli et avec le prototype de Manzanares. La conversion en puissance électrique, sur l'optimum de Schlaich, reste en revanche optimiste, car le modèle simplifie la tour (rendement du collecteur constant, pas de frottement dans la cheminée ni dans la turbine, pertes thermiques non représentées) ; pour retrouver la puissance de Manzanares, il faut d'ailleurs ramener le rendement de sa turbine monopale à 0,42 [14]. Les puissances et les

énergies calculées pour la tour sont donc des bornes supérieures. Les modèles du volant et de sa machine, classiques [6], [26], ne seront validés qu'après une confrontation à des mesures.

B. Gisement solaire et collecteur horizontal

Pour un collecteur horizontal, le mois le plus défavorable n'est pas celui de plus faible insolation. Janvier, au cœur de la saison des pluies, cumule l'insolation la plus courte (5,46 $h.j^{-1}$) et la fraction diffuse la plus forte (44 %), mais le soleil y passe près du zénith et l'irradiation extraterrestre y est proche de son maximum ; le minimum du gisement tombe en juin (4,88 $kWh.m^{-2}$ par jour) en année moyenne, et en juillet (4,32 $kWh.m^{-2}$) dans l'année la plus défavorable. Avec la température horaire, la tour produit 13,5 % de moins en juin qu'en janvier (32,00 contre 36,98 kWh par jour) : c'est sur l'hiver austral que le deuxième article dimensionne le collecteur, d'où le surplus de janvier (III-D). Le modèle ne représente ni les passages nuageux ni la variabilité d'un jour à l'autre ; l'approximation compte surtout en janvier, où la fraction diffuse atteint 44 %.

C. Compatibilité électrique

Le bus de 300 V découle directement de la machine du volant. Il doit dépasser 261 V pour que G2 reste commandable à pleine vitesse, et la marge prise (indice de modulation de 0,87) laisse de la place aux chutes de tension non modélisées, pourvu qu'on utilise une MLI vectorielle. Côté production, la situation est plus simple qu'avec un champ photovoltaïque : raccordée au bus par un redresseur, la génératrice G1 n'impose ni fenêtre de suivi du point de puissance maximale ni contrainte de longueur de chaîne. Cette simplicité est en partie trompeuse, car le modèle est écrit en puissance : le niveau de tension de G1, la vitesse de la turbine et la commande du redresseur, qui fixent le point de fonctionnement aérodynamique ($\Delta p_s = 2/3\ \Delta p_{tot}$), restent à étudier, de même que la dynamique de la régulation du bus (Tableau 3) et l'étage élévateur de l'onduleur des charges alternatives.

D. Configuration du stockage inertiel

Avec un coefficient de sécurité de 3,26, la jante en carbone/époxy supporte la vitesse maximale. Ce chiffre reste indicatif, car l'approximation d'anneau mince néglige l'anisotropie du composite et les effets de la température [16] ; la contrainte radiale, de 19,0 MPa, ne représente que 2,6 % de la contrainte circonférentielle. La plage de vitesse pèse directement sur l'encombrement : 44,4 % de l'énergie à pleine vitesse reste inutilisable, ce qui augmente le moment d'inertie nécessaire pour une capacité utile donnée. Le volant supporte en revanche des cycles quotidiens complets sans dégradation électrochimique ; le variateur borne son rendement aller-retour ($0{,}97^2$ = 94,1 %), et les pertes à vide (14 à 24 W) le ramènent à 89,5 % sur la journée (III-D). Le comportement dynamique du rotor, les paliers, l'enceinte sous vide et le confinement en cas de rupture devront être modélisés avant toute réalisation.

E. Limites de l'étude

Plusieurs limites sont à garder en tête. Le modèle de la tour est quasi statique : il ne représente pas l'inertie thermique du sol du collecteur, qui prolonge la production en soirée dans une centrale réelle [5], son rendement de collecteur est constant et ses coefficients de pertes ne sont pas renseignés. La tenue de la jante repose sur une approximation d'anneau mince. La température ambiante suit un profil horaire moyen par mois (2010–2024), sans variabilité d'une année à l'autre ; l'éclairement ne comporte ni nébulosité ni variabilité au cours de la journée, et les résultats ne portent que sur les journées types de janvier et d'octobre. Les convertisseurs de charge ne sont pas modélisés, bien que l'alternatif représente 85 % de l'énergie. Les coefficients d'Ångström–Prescott sont ceux de Glover et McCulloch pour les régions tropicales [11], et non des valeurs calées sur des mesures de rayonnement à Mahajanga ; huit des 180 valeurs d'insolation ont dû être reconstituées, et la série n'a pas été recoupée avec une base satellitaire. Aucune mesure sur une installation locale ne permet une validation expérimentale.

V.CONCLUSION

Ce travail a vérifié la cohérence de la configuration d'un système hybride tour solaire à cheminée et volant d'inertie, sans batterie, destiné au LPADER. Le système repose sur un bus continu commun de 300 V, imposé par la f.é.m. composée crête de la PMSG G2 (261 V) ; s'y raccordent la turbine-génératrice de la tour, par un redresseur, et un volant en carbone/époxy exploité entre 24

000 et 36 000 tr. min⁻¹. Sur la série ASECNA 2010–2024, le modèle de Liu et Jordan, avec les coefficients d'Ångström–Prescott de Glover et McCulloch et la fraction diffuse de Collares-Pereira et Rabl, donne pour Mahajanga, en année moyenne, 5,64 kWh.m^{-2} en janvier et 7,66 kWh.m^{-2} en octobre sur le collecteur horizontal, dont le minimum annuel tombe en juin (4,88 kWh.m^{-2}) ; la tour de 109 m, avec un collecteur de 91,0 m, produit alors 36,98 et 49,90 kWh par jour.

Les onze critères sont vérifiés, avec la réserve de portée indiquée en III-E : trois sont des contrôles de cohérence interne et un repose sur un calage de la turbine. La tour atteint la borne de Schlaich ; la puissance de Manzanares n'est retrouvée qu'avec le rendement de sa propre turbine (0,42), alors que le modèle de la tour emploie 0,72 : la production de la tour est donc à lire comme une borne supérieure. La machine reste commandable à pleine vitesse (m = 0,87), et la jante offre un coefficient de sécurité de 3,26.

Couplés au bus avec la charge du laboratoire sans marge (29,04 kWh/j), la tour et le volant de 11,8 kg·m² couvrent entièrement la demande comme en janvier comme en octobre et ferment leur bilan journalier. Le volant restitue l'énergie du soir et de la nuit avec un rendement journalier voisin de 89,5 %, et la machine G2 reste sous son couple nominal (80 % de son courant nominal au plus).

Ces modèles servent de base au dimensionnement et à l'exploitation . Il faudra ensuite représenter l'inertie thermique du sol du collecteur, introduire des passages nuageux et confronter les modèles à des mesures sur prototype.

RÉFÉRENCES

[1] Hirsch, A., Parag, Y., Guerrero, J. « Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 90, pp. 402–411, 2018. DOI : 10.1016/j.rser.2018.03.040.

[2] Ibrahim, M. M. « Energy management strategies of hybrid renewable energy systems: A review », Wind Engineering, SAGE Publications, vol. 48, n° 1, pp. 133–161, 2024. DOI : 10.1177/0309524X231200010.

[3] Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., Schlaich, J. « Solar chimneys, Part I: Principle and construction of the pilot plant in Manzanares », International Journal of Solar Energy, vol. 2, n° 1, pp. 3–20, 1983. DOI : 10.1080/01425918308909911.

[4] Schlaich, J. The Solar Chimney: Electricity from the Sun. Stuttgart : Edition Axel Menges, 1995.

[5] Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., Weinrebe, G. « Design of commercial solar updraft tower systems – utilization of solar induced convective flows for power generation », Journal of Solar Energy Engineering, ASME, vol. 127, n° 1, pp. 117–124, 2005.

[6] Bolund, B., Bernhoff, H., Leijon, M. « Flywheel energy and power storage systems », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 11, n° 2, pp. 235–258, 2007. DOI : 10.1016/j.rser.2005.01.004.

[7] Leclercq, L. Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services système. Thèse de doctorat en génie électrique, Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL – Lille 1), Villeneuve-d'Ascq, France, 2004.

[8] Liu, B. Y. H., Jordan, R. C. « The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation », Solar Energy, Elsevier, vol. 4, n° 3, pp. 1–19, 1960.

[9] Ångström, A. « Solar and terrestrial radiation », Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 50, n° 210, pp. 121–126, 1924.

[10] Prescott, J. A. « Evaporation from a water surface in relation to solar radiation », Transactions of the Royal Society of South Australia, vol. 64, pp. 114–118, 1940.

[11] Glover, J., McCulloch, J. S. G. « The empirical relation between solar radiation and hours of bright sunshine in the high-altitude tropics », Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 84, n° 359, pp. 56–60, 1958. DOI : 10.1002/qj.49708435907.

[12] Collares-Pereira, M., Rabl, A. « The average distribution of solar radiation – correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values », Solar Energy, Elsevier, vol. 22, n° 2, pp. 155–164, 1979.

[13] Haaf, W. « Solar chimneys, Part II: Preliminary test results from the Manzanares pilot plant », International Journal of Solar Energy, vol. 2, n° 2, pp. 141–161, 1984.

[14] Pretorius, J. P., Kröger, D. G. « Critical evaluation of solar chimney power plant performance », Solar Energy, Elsevier, vol. 80, n° 5, pp. 535–544, 2006.

[15] Upadhyay, P., Mohan, N. « Simulation and analysis of high-speed modular flywheel energy storage systems using MATLAB/Simulink », Department of Electrical and Computer Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, Symposium 2009 (GCMS 2009), pp. 74–79.

[16] Filion, G. Conception d'un système de stockage inertiel d'énergie à moyen terme — Développement d'outils numériques et validation expérimentale. Thèse de doctorat, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, Canada, 2015.

[17] ASECNA / Direction Générale de la Météorologie de Madagascar, Station de Mahajanga. Données mensuelles d'insolation, de température et de pression, 2010–2024. Mahajanga, Madagascar, 2026.

[18] Bose, B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall PTR, 2002.

[19] Dragičević, T., Lu, X., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M. « DC microgrids—Part II: A review of power architectures, applications, and standardization issues », IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, n° 5, pp. 3528–3549, 2016. DOI : 10.1109/TPEL.2015.2464277.

[20] Meng, L., Shafiee, Q., Ferrari-Trecate, G., Karimi, H., Fulwani, D., Lu, X., Guerrero, J. M. « Review on control of DC microgrids and multiple microgrid clusters », IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 5, n° 3, pp. 928–948, 2017.

[21] Dragičević, T., Lu, X., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M. « DC microgrids—Part I: A review of control strategies and stabilization techniques », IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, n° 7, pp. 4876–4891, 2016. DOI : 10.1109/TPEL.2015.2478859.

[22] Duffie, J. A., Beckman, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, 4e éd. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2013, 910 p.

[23] Bernardes, M. A. dos S., Voß, A., Weinrebe, G. « Thermal and technical analyses of solar chimneys », Solar Energy, Elsevier, vol. 75, n° 6, pp. 511–524, 2003.

[24] Bakay, L. Dimensionnement et pertes dans un centreur magnétique guidant un volant d'inertie soumis à un balourd : application au stockage d'énergie de longue durée. Thèse de doctorat, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, Canada, 2012.

[25] Pillay, P., Krishnan, R. « Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, Part I: The permanent-magnet synchronous motor drive », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, n° 2, pp. 265–273, mars/avril 1989.

[26] Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 2e éd. Piscataway, NJ : IEEE Press / Wiley-Interscience, 2002.