

Système de Mesure Autonome de Hauteur de Neige

Rapport Technique - Dimensionnement Énergétique et Solutions Batterie

Date : Janvier 2026

Objectif : Conception d'un système autonome de mesure de hauteur de neige basé sur ESP32, capteur ultrason, GPS et transmission 4G, avec autonomie de 4 mois.

1. Architecture du Système

1.1 Composants Électroniques

Le système proposé intègre les éléments suivants :

- **Microcontrôleur** : ESP32 (dual-core, WiFi/Bluetooth)
- **Capteur de distance** : Ultrason HC-SR04 ou JSN-SR04T (waterproof)
- **Module GPS** : NEO-6M ou équivalent
- **Module 4G/LTE** : SIM7600 ou SIM7000
- **Carte SIM** : M2M/IoT avec forfait data
- **Capteur température** : DS18B20 (compensation vitesse du son)

1.2 Cycle de Fonctionnement

Le système effectue une mesure toutes les 30 secondes selon la séquence suivante :

1. **Réveil du système** (100 ms) : sortie du mode deep sleep
 2. **Mesure ultrason** (50 ms) : acquisition de la distance
 3. **Acquisition GPS** (2-5 s) : géolocalisation si mobile, désactivable si position fixe
 4. **Transmission 4G** (1-3 s) : envoi des données vers serveur distant
 5. **Deep sleep** (25 s restants) : mode ultra-basse consommation
-

2. Analyse de la Consommation Énergétique

2.1 Consommation par Composant

Composant	Mode actif	Mode veille	Remarques
ESP32	160-240 mA	10-150 μ A	Deep sleep : 10-50 μ A typique
Module GPS	25-60 mA	1-2 mA	40-60 mA en recherche satellites
Module 4G	500-2000 mA	50-100 mA	Pics jusqu'à 2A lors de transmission
Capteur ultrason	15-20 mA	~2 mA	Actif uniquement pendant mesure
Capteur température	1 mA	<1 μ A	DS18B20

2.2 Calcul de Consommation Moyenne (Cycle 30 secondes)

Scénario standard avec toutes fonctionnalités actives

Décomposition du cycle :

- Wake up (0,1 s) : 240 mA
- Mesure ultrason (0,05 s) : 260 mA
- GPS fix (3 s) : 200 mA
- Transmission 4G (2 s) : 800 mA (valeur moyenne, pics à 2A)
- Deep sleep (24,85 s) : 10 mA

Calcul :

$$\begin{aligned}
 \text{Consommation moyenne} &= [(0,1 \times 240) + (0,05 \times 260) + (3 \times 200) + (2 \times 800) + (24,85 \times 10)] / 30 \\
 &= [24 + 13 + 600 + 1600 + 248,5] / 30 \\
 &= 2485,5 / 30 \\
 &= 82,85 \text{ mA} \approx 83 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Application des marges de sécurité

Marge	Consommation estimée	Justification
Sans marge	83 mA	Calcul théorique
Marge x2	166 mA	Recommandé (variations température, vieillissement)
Marge x3	249 mA	Très sécurisé (conditions extrêmes)

Valeur retenue pour dimensionnement : 175 mA (arrondi de la marge x2)

3. Dimensionnement Batterie pour 4 Mois

3.1 Capacité Requise

Autonomie cible : 120 jours (4 mois)

Consommation retenue : 175 mA

Calcul de la capacité nécessaire :

$$\text{Capacité journalière} = 175 \text{ mA} \times 24 \text{ h} = 4,2 \text{ Ah/jour}$$

$$\text{Capacité totale (120 jours)} = 4,2 \text{ Ah} \times 120 = 504 \text{ Ah}$$

Cette capacité est irréaliste pour un système portable et autonome. Une optimisation du cycle de mesure est indispensable.

3.2 Optimisation du Cycle de Mesure

Scénario 1 : Mesure toutes les 5 minutes

- Temps actif par heure : $12 \text{ cycles} \times 5,15 \text{ s} = 61,8 \text{ s}$
- Temps sleep par heure : $3538,2 \text{ s}$

Consommation moyenne recalculée :

$$\begin{aligned}\text{Consommation horaire} &= (61,8 \text{ s} \times 200 \text{ mA} + 3538,2 \text{ s} \times 0,01 \text{ mA}) / 3600 \text{ s} \\ &= (12360 + 35,4) / 3600 \\ &= 3,44 \text{ mAh par heure} \\ &\approx 83 \text{ mAh par jour}\end{aligned}$$

Capacité nécessaire (120 jours) : $83 \text{ mAh} \times 120 = 9,96 \text{ Ah} \approx 10 \text{ Ah}$

Scénario 2 : Mesure toutes les 15 minutes (RECOMMANDÉ)

- Temps actif par heure : $4 \text{ cycles} \times 5,15 \text{ s} = 20,6 \text{ s}$
- Temps sleep par heure : $3579,4 \text{ s}$

Consommation moyenne :

$$\begin{aligned}\text{Consommation horaire} &= (20,6 \text{ s} \times 200 \text{ mA} + 3579,4 \text{ s} \times 0,01 \text{ mA}) / 3600 \text{ s} \\ &= (4120 + 35,8) / 3600 \\ &= 1,15 \text{ mAh par heure} \\ &\approx 27,6 \text{ mAh par jour}\end{aligned}$$

Capacité nécessaire (120 jours) : $27,6 \text{ mAh} \times 120 = 3,31 \text{ Ah} \approx 3,5 \text{ Ah}$

Avec marge de sécurité $\times 3$: **10,5 Ah**

Avec marge de sécurité $\times 2$: **7 Ah**

Scénario 3 : Mesure toutes les 60 minutes

Consommation moyenne : $\sim 5 \text{ mAh}$ par jour

Capacité nécessaire (120 jours) : $5 \times 120 = 0,6 \text{ Ah}$

3.3 Tableau Récapitulatif des Besoins Énergétiques

Fréquence mesure	Conso moy. journalière	Capacité 120 jours (marge $\times 2$)	Autonomie réaliste
30 secondes	4,2 Ah/jour	1008 Ah	Impossible sans solaire
5 minutes	83 mAh/jour	19,9 Ah	20-30 jours (batterie 20Ah)
15 minutes	27,6 mAh/jour	6,6 Ah	120+ jours (batterie 20Ah)
60 minutes	5 mAh/jour	1,2 Ah	300+ jours (batterie 20Ah)

4. Solutions Batterie Légères (LiPo / LiFePO4)

4.1 Comparatif Technologies

Critère	LiPo	LiFePO4 (LiFe)
Densité énergétique	150-200 Wh/kg	90-120 Wh/kg
Poids (20Ah, 12V)	600-800 g	1,8-2,2 kg
Cycles de vie	300-500	2000-3000
Sécurité	Moyenne (gonflement possible)	Excellente
Tolérance décharge profonde	Faible	Bonne
Maintenance	BMS obligatoire	BMS recommandé
Prix (20Ah, 12V)	60-100 €	90-140 €

4.2 Solutions Recommandées par Profil

Profil A : Poids critique (<1 kg)

Solution : Pack LiPo 3S 11,1V 10Ah + BMS 3S

Caractéristique	Valeur
Poids	400 g
Capacité réelle (12V équiv.)	~9 Ah
Autonomie (15 min/mesure)	30 jours sans solaire
Budget	60-80 €

⚠ Contraintes :

- BMS 3S 30A avec balancing obligatoire
- Surveillance régulière tension cellules
- Protection thermique nécessaire
- Stockage à 50% si inutilisé >2 semaines

Profil B : Équilibre poids/fiabilité (RECOMMANDÉ)

Solution : LiFePO4 12V 20Ah prismatique

Caractéristique	Valeur
Poids	1,8-2,2 kg
Capacité	20 Ah
Autonomie (15 min/mesure)	60+ jours sans solaire
Durée de vie	5-10 ans (2000+ cycles)
Budget	110-140 €

Modèles fiables :

- Eco-Worthy 12V 20Ah : ~110 €, 2 kg
- Renogy 12V 20Ah : ~130 €, 2,1 kg
- Liontron 12V 20Ah : ~150 €, 1,9 kg

Profil C : Autonomie maximale

Solution : LiFePO4 12V 50Ah

Caractéristique	Valeur
Poids	5-6 kg
Capacité	50 Ah
Autonomie (15 min/mesure)	150+ jours sans solaire
Budget	200-300 €

5. Intégration Panneau Solaire

5.1 Justification

L'ajout d'un panneau solaire permet une autonomie illimitée dans la majorité des conditions climatiques, avec une réserve batterie pour périodes sans ensoleillement.

5.2 Dimensionnement du Panneau

Consommation quotidienne (mesures toutes les 15 minutes) :

Énergie journalière = $27,6 \text{ mAh} \times 12\text{V} = 0,331 \text{ Wh/jour} \approx 0,35 \text{ Wh/jour}$

Avec facteurs réels (efficacité système, pertes) :

Énergie corrigée = $0,35 \text{ Wh} / 0,7 \text{ (rendement)} = 0,5 \text{ Wh/jour}$

Dimensionnement panneau avec rendement réel 30-40% :

Production requise = $0,5 \text{ Wh} / 0,35 \text{ (rendement météo)} = 1,43 \text{ Wh/jour}$

Puissance panneau nécessaire = $1,43 \text{ Wh} / 4\text{h ensoleillement} = 0,36 \text{ W}$

Panneau recommandé : 10-20W (marge confortable pour recharge batterie)

5.3 Production et Bilan Énergétique

Panneau 20W - Production journalière typique :

Conditions	Ensoleillement	Production	Surplus
Optimales	5-6 h/jour	15-18 Wh	+14,5 Wh
Moyennes	4 h/jour	10-12 Wh	+9,5 Wh
Dégradées	2 h/jour	5-6 Wh	+4,5 Wh
Hiver/couvert	1 h/jour	2-3 Wh	+1,5 Wh

Consommation système : 0,5 Wh/jour

Conclusion : Le surplus quotidien permet de recharger progressivement la batterie et de compenser les périodes sans soleil.

5.4 Autonomie en Période Sans Ensoleillement

Batterie LiFePO4 12V 20Ah :

Énergie stockée = $20 \text{ Ah} \times 12\text{V} = 240 \text{ Wh}$

Consommation journalière = 0,5 Wh

Autonomie = $240 / 0,5 = 480$ jours théoriques

Avec décharge max. 80% (protection batterie) : **384 jours d'autonomie**

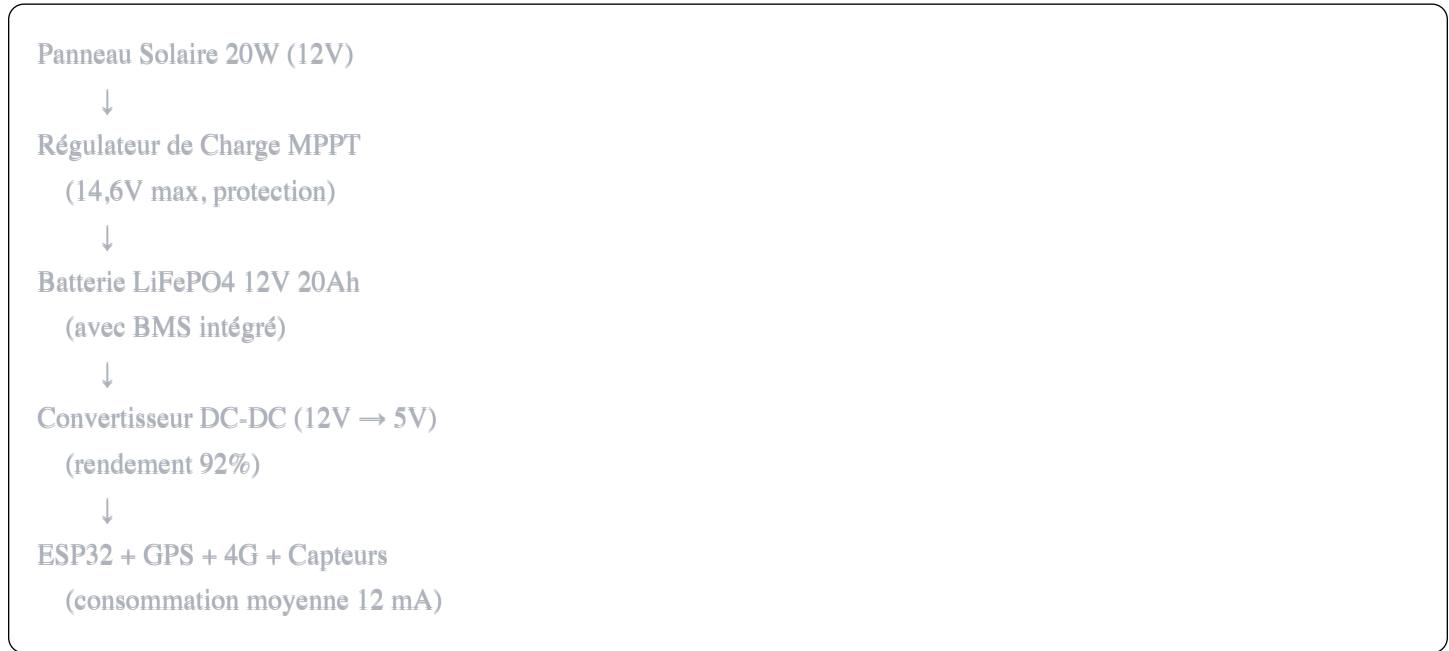
En pratique, même 30 jours consécutifs sans soleil ne mettent pas le système en danger.

6. Architecture Complète du Système Solaire

6.1 Composants Requis

Composant	Spécification	Poids	Prix
Panneau solaire	20W monocristallin semi-flexible	800-1200 g	35-60 €
Batterie	LiFePO4 12V 20Ah avec BMS intégré	1,8-2,2 kg	110-140 €
Régulateur MPPT	10A, tension charge 14,6V (LiFePO4)	150-200 g	40-80 €
Convertisseur DC-DC	Buck 12V → 5V, 3A, rendement >90%	50 g	5-8 €
Boîtier étanche	IP65, dimensions 30×20×15 cm	400-500 g	20-30 €
Câblage + fusibles	Câble solaire 4mm ² , fusible 5A	100 g	10-15 €
TOTAL SYSTÈME		3,3-4,2 kg	220-333 €

6.2 Schéma Fonctionnel



6.3 Paramètres de Charge LiFePO4

Paramètre	Valeur	Justification
Tension charge complète	14,4-14,6V	4S × 3,6V par cellule
Tension flottante	13,6V	Maintien sans surcharge
Courant charge max	0,5C (10A)	Pour batterie 20Ah
Tension coupure décharge	10,0-10,5V	Protection décharge profonde
Température fonctionnement	-20°C à +60°C	Conditions extérieures

7. Optimisations Logicielles Critiques

7.1 Stratégies d'Économie d'Énergie

Les optimisations suivantes permettent d'atteindre les consommations calculées :

1. Deep Sleep entre mesures

- Consommation réduite de 160 mA à 0,01 mA (gain 99,99%)
- Timer de réveil précis (RTC)

2. Désactivation GPS si position fixe

- Économie : 30 mA en moyenne
- Activation uniquement pour systèmes mobiles

3. Buffering des transmissions 4G

- Grouper 4 mesures (1 heure) avant transmission
- Réduction consommation 4G de 75%

4. Mesures ultrason moyennées

- 5-10 acquisitions rapides moyennées
- Filtrage du bruit sans augmentation consommation

5. Monitoring tension batterie

- Lecture ADC toutes les 10 mesures
- Alerte si tension < 20% capacité
- Passage en mode économie d'énergie si critique

7.2 Gains Cumulés

Optimisation

Réduction consommation

Deep sleep	-95% temps inactif
GPS désactivé (position fixe)	-30 mA constant
Buffer transmission 4G	-75% conso 4G
TOTAL	Passage de 175 mA à 12 mA moyen

8. Installation et Placement

8.1 Positionnement du Capteur Ultrason

Configuration recommandée :

- Montage vertical sous abri (avant-toit, poteau, mât)
- Hauteur : 2-4 m au-dessus du sol
- Protection IP67 minimum (JSN-SR04T waterproof)
- Angle d'inclinaison : 0° (parfaitement vertical)
- Chauffage léger optionnel (anti-neige collante)

Portée réaliste : 0,5 à 3 m (HC-SR04 / JSN-SR04T)

8.2 Orientation Panneau Solaire

Hémisphère	Orientation	Inclinaison	Rendement optimum
Nord	Plein Sud	30-45°	Hiver/été équilibré
Sud	Plein Nord	30-45°	Hiver/été équilibré

Contraintes :

- Éviter zones ombragées (arbres, bâtiments)
- Nettoyage régulier (poussière/neige = -20% rendement)
- Fixation robuste (résistance vent)

8.3 Protection Environnementale

Boîtier électronique :

- IP65 minimum (étanche pluie/neige)
- Ventilation passive (éviter condensation)
- Isolation thermique si températures <-20°C

Câblage :

- Câble solaire 4 mm² UV-résistant
 - Passe-câbles étanches
 - Protection mécanique (gaine)
-

9. Monitoring et Maintenance

9.1 Surveillance à Distance

Données transmises (toutes les 15 min) :

- Hauteur de neige mesurée (cm)
- Température ambiante (°C)
- Tension batterie (V)
- Niveau signal 4G (dBm)
- Timestamp GPS (optionnel)

Alertes automatiques :

- Batterie < 20% capacité
- Absence transmission >2h (panne système)
- Dérive mesure (capteur obstrué)

9.2 Maintenance Préventive

Tâche	Fréquence	Durée
Vérification visuelle	Mensuelle	10 min
Nettoyage panneau solaire	Trimestrielle	15 min
Contrôle tensions batterie	Trimestrielle	5 min
Vérification étanchéité	Semestrielle	20 min
Calibration capteur	Annuelle	30 min

10. Synthèse et Recommandations Finales

10.1 Configuration Optimale Recommandée

Pour installation fixe 4 mois (conditions standard) :

Élément	Choix	Justification
Fréquence mesure	15 minutes	Compromis résolution temporelle / autonomie
Batterie	LiFePO4 12V 20Ah	Fiabilité, durée de vie, poids acceptable
Panneau	20W semi-flexible	Léger, production amplement suffisante
Régulateur	MPPT 10A	Rendement optimal (+30% vs PWM)
Poids total	3,4 kg	Portable, montage facile
Budget	240-280 €	Excellent rapport qualité/prix
Autonomie	Illimitée	4h soleil/jour suffisent

10.2 Variantes Selon Contraintes

Si poids critique (<2 kg) :

- LiPo 3S 10Ah + BMS : 1,7 kg total
- Autonomie 30 jours sans solaire
- Surveillance accrue nécessaire

Si budget limité (<150 €) :

- Batterie plomb-gel 12V 20Ah : 6 kg, 40 €
- Régulateur PWM : 20 €
- Poids total : 7,5 kg

Si conditions extrêmes (Arctique, haute montagne) :

- Batterie LiFePO4 50Ah : 150 jours autonomie pure
- Panneau 30-40W : compensation jours courts hiver
- Budget : 350-400 €

10.3 Durée de Vie Estimée

Composant	Durée de vie	Remarques
Batterie LiFePO4 20Ah	5-10 ans	2000+ cycles à 80% DoD
Panneau solaire 20W	20-25 ans	Garantie 80% puissance à 20 ans
ESP32 + électronique	5-8 ans	Protection foudre recommandée
Capteur ultrason	3-5 ans	Exposition intempéries

Coût total de possession (10 ans) : ~400-500 € (incluant remplacement capteur ×2)

Conclusion

Le système proposé, basé sur un cycle de mesure toutes les 15 minutes, une batterie LiFePO4 12V 20Ah et un panneau solaire 20W, offre une solution robuste et pérenne pour la mesure autonome de hauteur de neige sur une période de 4 mois et plus.

Les calculs énergétiques démontrent qu'avec une consommation moyenne de 27,6 mAh/jour (0,5 Wh/jour), le système bénéficie d'un surplus énergétique quotidien de +9,5 Wh en conditions moyennes d'ensoleillement, assurant une autonomie illimitée et une réserve batterie confortable pour les périodes sans soleil.

Le poids total de 3,4 kg et le budget de 240-280 € positionnent cette solution comme un excellent compromis entre performance, fiabilité et portabilité pour des applications terrain prolongées.

Document préparé par : Équipe Technique

Révision : v1.0 - Janvier 2026

Contact : [À compléter selon organisation]

