

BATTERIE PARALLELATOR

Une Battery Management Unit qui met en parallèle jusqu'à 16 packs 24-30 V en toute sécurité : chaque batterie est mesurée individuellement, et déconnectable par MOSFET dès qu'elle sort des clous.

L'Electron Rare – Clément Saillant

GPLv3

2026

16

packs supervisés (32 en dual-bus)

24-30 V

classe 24 V (7s Li-ion / 8s LFP) · variante 48 V (13s) dessinée

4×4

4 cartes × 4 voies, chaînées RJ45

2 mΩ

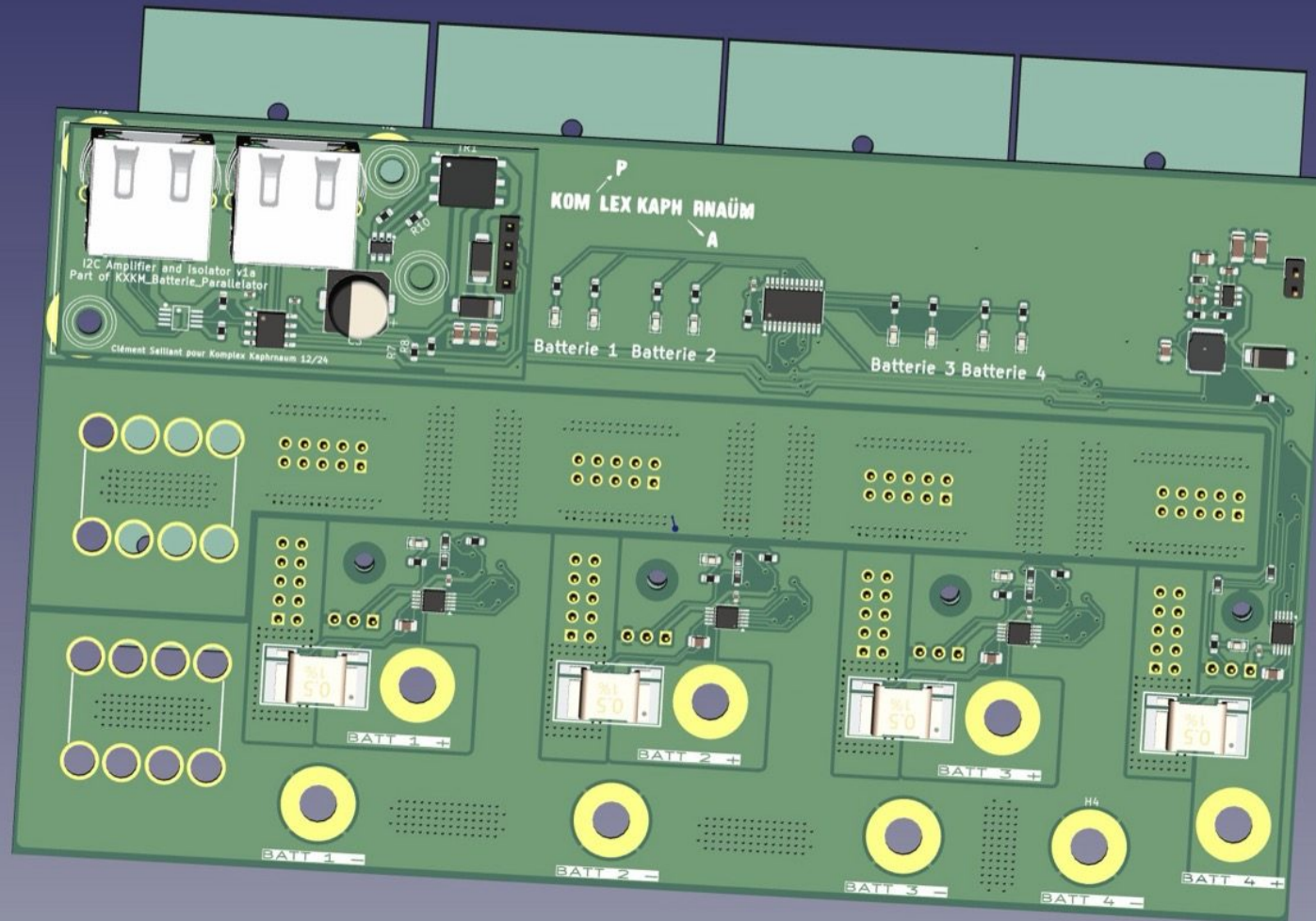
shunt de mesure par voie

8

MOSFETs par voie, back-to-back

26

tests automatisés, sans matériel



La carte BMU v2 assemblée – 4 voies batterie, sous-cartes MOSFET verticales, module « I2C Amplifier and Isolator » en tête.

BMU.jpeg – rendu FreeCAD

Quand une installation doit vivre plusieurs heures sans réseau électrique – LED, son, projection, contrôle – un seul pack 24-30 V ne suffit pas. La mise en parallèle est la réponse naturelle : elle additionne les capacités sans changer la tension du bus.

AUTONOMIE

Les ampères-heures s'additionnent : 4 packs de 100 Ah = 400 Ah sous la même tension. La durée de l'installation se dimensionne en ajoutant des packs.

PUISSANCE CRÊTE

Le courant se répartit entre les branches : chaque pack ne fournit qu'une fraction de la pointe, et reste dans sa zone de confort thermique.

REDONDANCE

Un pack défaillant ne doit pas éteindre le système – à condition de pouvoir l'isoler proprement pendant que les autres continuent.

PARC HÉTÉROGÈNE

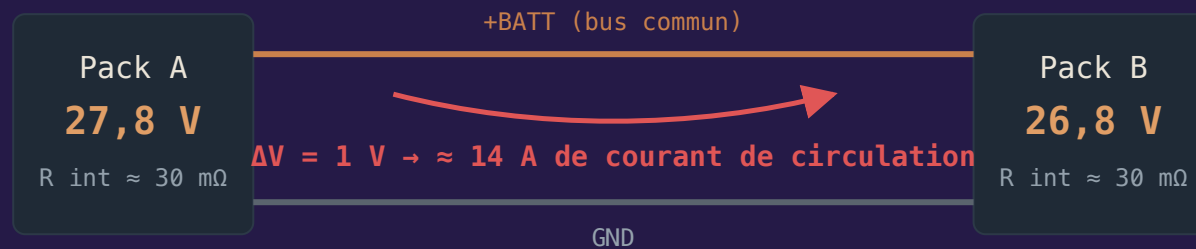
Sur le terrain, les packs n'ont ni le même âge ni le même état de charge. Il faut pouvoir les combiner sans rituel de pré-équilibre manuel.

« La mise en parallèle naïve de batteries à des états de charge différents génère des courants d'équilibrage dangereux. »

Spécification du projet – gate S0, 2026-03-25

C'est tout l'objet de la BMU : offrir les bénéfices du parallèle sans ses dangers. Un boîtier **ESP32-S3-BOX-3** à écran tactile pilote une électronique de puissance dédiée, avec supervision BLE, app iOS et télémétrie cloud.

Deux packs connectés en parallèle s'imposent mutuellement leur tension. Toute différence d'état de charge se traduit par un courant de circulation que rien ne limite, sinon les résistances internes.



sans aucune charge branchée – uniquement pour équilibrer les tensions

$$I_{\text{circulation}} = \Delta V / (R_{\text{int}.A} + R_{\text{int}.B} + R_{\text{câblage}})$$

Ordre de grandeur : $\Delta V = 1 \text{ V}$ et $\Sigma R \approx 70 \text{ m}\Omega$ donnent $\approx 14 \text{ A}$ – au-delà du seuil de coupure de la BMU (10 A) et très au-delà du déséquilibre admis par le cahier des charges (1 A).

COURANT D'INRUSH À LA CONNEXION

Brancher un pack chargé sur un bus plus bas : l'appel de courant n'est limité que par quelques dizaines de milliohms. Arcs, connecteurs abîmés, fusibles.

DÉCHARGE CROISÉE

Un pack faible ou vieilli devient une charge pour les autres : les packs sains le rechargent en continu, l'énergie stockée part en chaleur.

VIEILLISSEMENT ASYMÉTRIQUE

Les résistances internes divergent avec l'âge. Le pack le plus « raide » travaille moins, le plus faible encaisse tout – et vieillit encore plus vite.

RECHARGE INCONTRÔLÉE PAR BODY DIODE

Un simple MOSFET de coupure laisse passer le courant dans un sens via sa diode de corps : la voie « coupée » peut quand même se faire recharger. Il faut un blocage bidirectionnel.

DÉFAUT ALIMENTÉ PAR TOUTE LA FLOTTE

Une cellule en court-circuit dans un pack est alimentée par tous les autres packs en parallèle : l'énergie cumulée aggrave l'emballement thermique.

BMS INTERNES AVEUGLES

Chaque pack a son BMS, mais aucun ne voit le système global : personne n'arbitre le déséquilibre entre packs. C'est le rôle de la BMU.

SURVEILLER CHAQUE PACK, COUPER VITE, RECONNECTER PRUDEMMENT

Formalisé en gates **Kill_LIFE** (S0 intake → S3 validation terrain). Les fonctions MUST du gate S1 (`specs/01_spec.md`) :

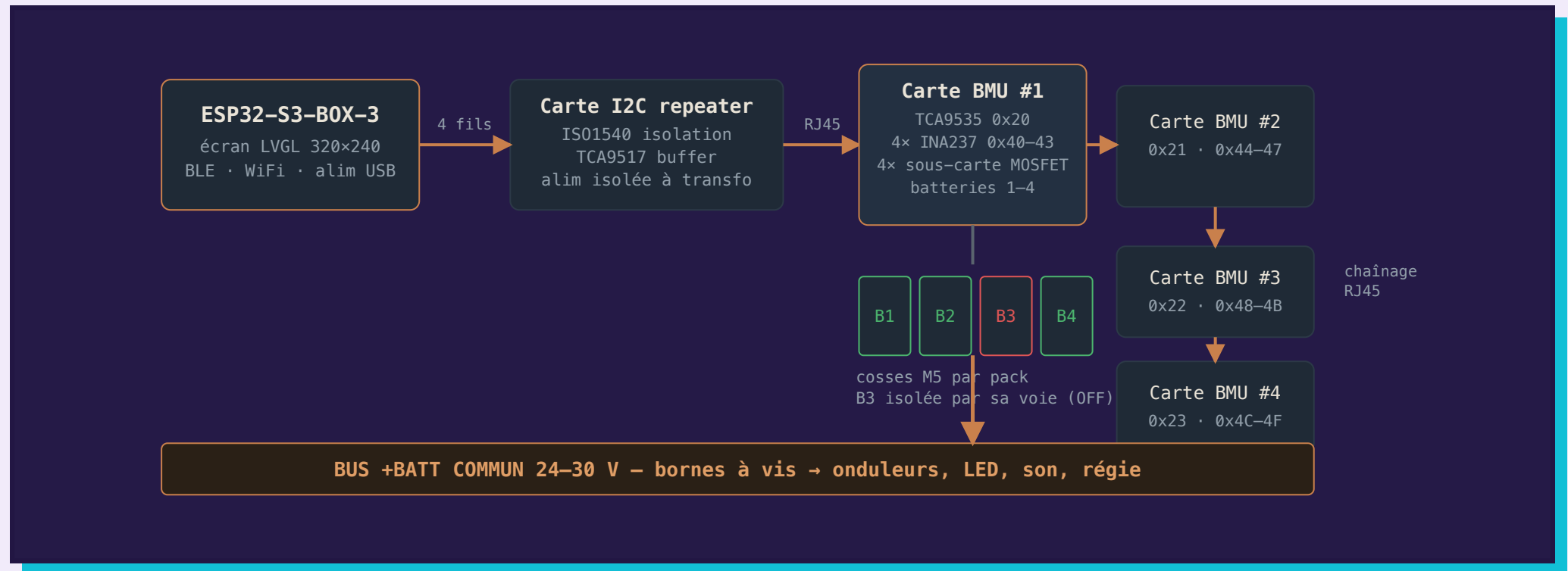
ID	FONCTION	RÉPONSE DU SYSTÈME
F01–F02	Mesure tension + courant par batterie	INA237 sur I2C, 5 lectures/s
F03–F04	Coupure sur sur-tension / sous-tension	> 30 V ou < 24 V → MOSFET OFF
F05	Coupure sur sur-courant (bidirectionnel)	$I > \text{seuil} \rightarrow \text{OFF}$, défaut dur à 1,4× le seuil
F06	Coupure sur déséquilibre de tension	> 1 V sous le max de la flotte → OFF
F07	Reconnexion automatique	délai 10 s après disparition du défaut
F08	Verrouillage permanent	> 5 coupures → LOCKED jusqu'au reboot
F11	Jusqu'à 16 packs	4 cartes × 4 voies chaînées (32 en dual-bus firmware)

SEUIL	DÉFAUT	CONFIGURABLE
Tension minimale	24 000 mV	Kconfig + NVS (écran, BLE) – page 20-30 V
Tension maximale	30 000 mV	Kconfig + NVS – page 25-35 V
Courant maximal	10 000 mA	Kconfig + NVS – page 1-50 A (spec initiale : 1 A)
Déséquilibre vs max flotte	1 000 mV	Kconfig + NVS – page 0,1-5 V
Délai de reconnexion	10 000 ms	Kconfig
Coupures avant verrouillage	5	Kconfig

- **Règle safety du projet** : les seuils ne peuvent jamais être affaiblis à distance – les écritures BLE sont bornées aux plages ci-dessus, chiffrement de lien obligatoire, et la machine de protection garde le droit de veto sur toute commande.

Découverte clé de l'analyse des schémas : la carte mère ne porte pas 16 voies mais **4**.

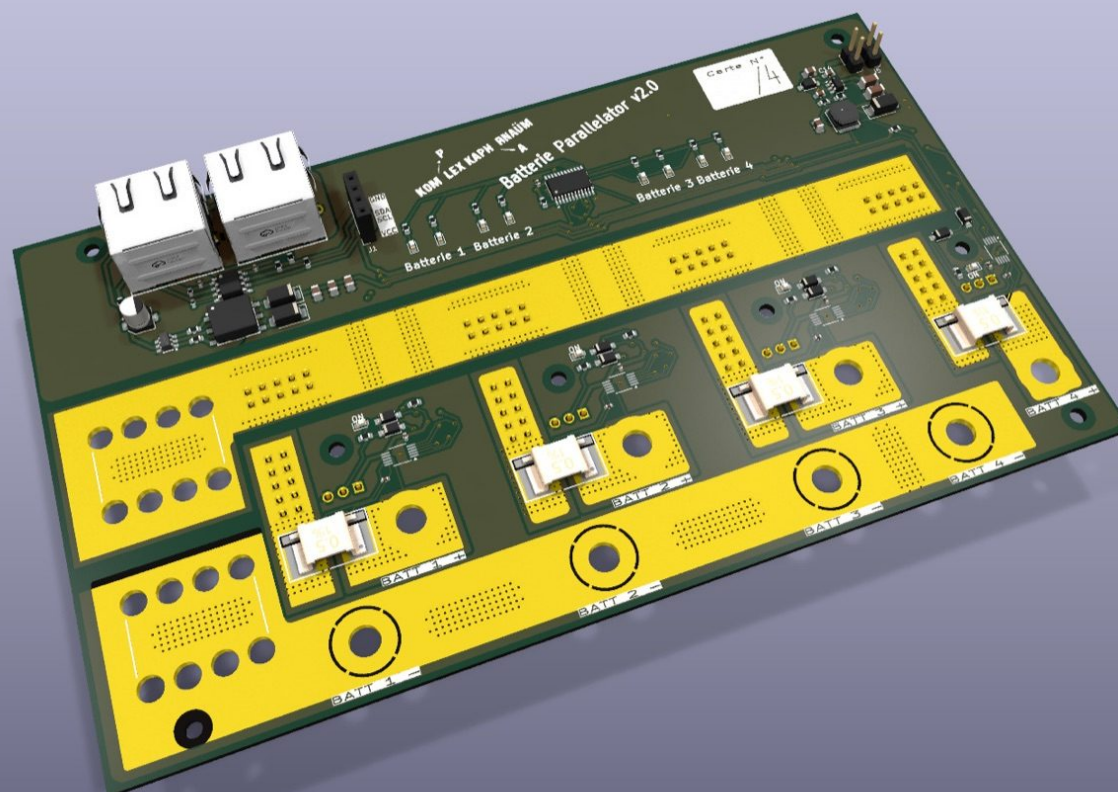
Le système complet est modulaire – quatre cartes identiques chaînées par câble RJ45, chacune flottant au potentiel de ses batteries.



CARTE	TCA9535	INA237	BATTERIES
#1	0x20	0x40–0x43	1–4
#2	0x21	0x44–0x47	5–8
#3	0x22	0x48–0x4B	9–12
#4	0x23	0x4C–0x4F	13–16

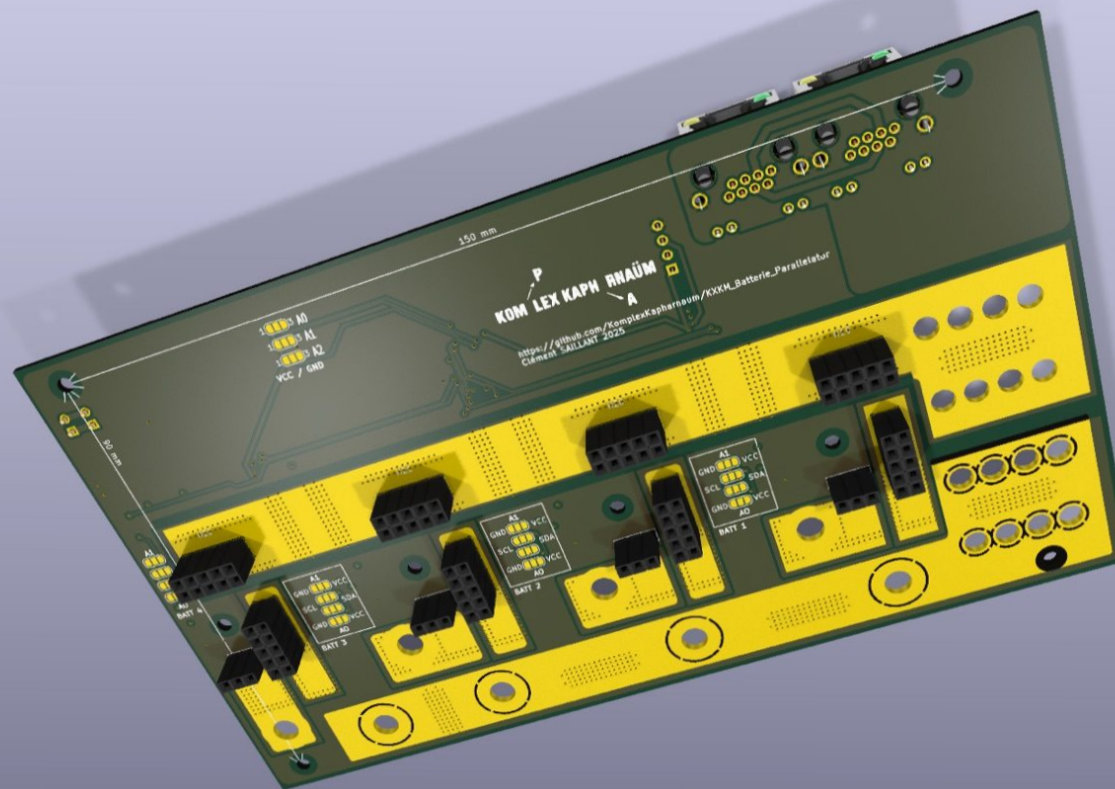
$Nb_TCA \times 4 == Nb_INA$

Vérifié au boot, à chaque cycle de protection et à chaque re-scan hotplug (10 s). Toute incohérence – carte débranchée, capteur muet – déclenche le shutdown de la carte, et le système reste vivant pour re-détecter une topologie valide.



Face avant – RJ45 de bus et bandeau logique en haut (TCA9535, adressage, buck Manual ON), 4 voies de puissance à cuivre nu avec leur shunt 2 mΩ et leur INA237.

rendu kicad-cli · BMU v2.kicad_pcb



Face arrière – les embases 2×5 où s'enfichent les sous-cartes MOSFET (deux par voie : entrée batterie / bus), les connecteurs de commande 3 points, et les tables d'adressage A0/A1/A2 sérigraphiées à côté de chaque groupe de jumpers.

rendu kicad-cli · face B

STACKUP 4 COUCHES

1,6 mm FR4, cuivre 35 µm (1 oz) sur les 4 couches. Les nets de puissance (+BATT, +BAT_IN ×4, sorties shunt ×4, GND) sont des zones remplies **simultanément sur F/In1/In2/B** : 4 × 35 µm de section.

140 EMPREINTES · 92 NETS

103 vias (0,8/0,4 mm), pistes signal 0,2-0,5 mm. Layout des 4 voies répliqué par plugin (replicate layout). BOM ~107 références, flux JLCPCB outillé (kicad-jlcpcb-tools, 20 réf. LCSC dans les schémas).

CONNECTIQUE DE PUISSANCE

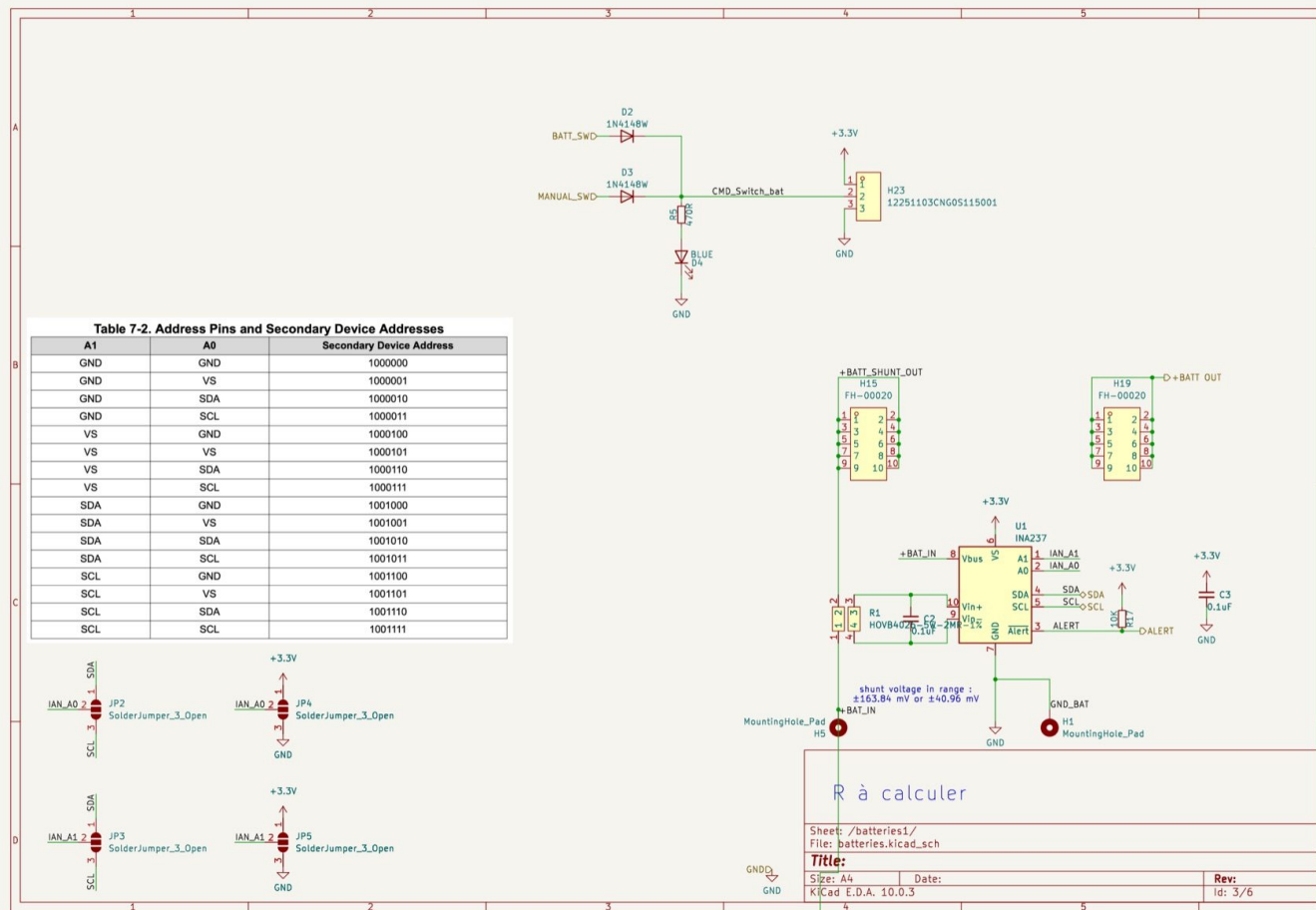
Par voie : pastilles **M5** à cosse (+BAT_IN, GND). Bus de sortie : 2 bornes à vis traversantes (J11 +BATT, J12 GND). Sous-cartes : embases 2×5 – 10 contacts en parallèle par côté.

ADRESSAGE 100 % PASSIF

19 solder jumpers 3 pads (JP2-JP20). L'INA237 accepte 4 niveaux (GND/VS/SDA/SCL) sur A0/A1 : **16 adresses avec 2 pins**. Table de correspondance dans `adresse TCA_INA.xlsx`.

La v1 (193,5 × 105 mm, fabriquée) commutait le **moins** avec des IRFZ44N traversants ; la v2 passe en high-side, sous-cartes enfichables par l'arrière – comparatif complet en section 12.

Le TI INA237 est un moniteur de puissance à ADC delta-sigma **16 bits** : il mesure la chute sur le shunt ($\pm 163,84$ mV ou $\pm 40,96$ mV pleine échelle), la tension bus avec un mode commun jusqu'à **+85 V**, la température (± 1 °C) – et calcule courant et puissance en interne.



Feuille « batteries1 » (répliquée x4) : shunt Kelvin + INA237, jumpers d'adressage A0/A1, diode-OR de commande (BATT_SW / MANUAL_SW), LED bleue témoin, connecteur vers la sous-carte MOSFET.

batteries.kicad_sch · cliquer pour zoomer

Mesure côté haut, en 4 fils

- ◆ **Shunt HOVB4026** : $2 \text{ m}\Omega \cdot 5 \text{ W} \cdot 1 \% \cdot 4$ terminaux – les pads de puissance portent le courant, les pads sense partent vers IN+/IN– en **Kelvin**, filtrés par $0,1 \mu\text{F}$ différentiel.
- ◆ À $2 \text{ m}\Omega$, la pleine échelle $\pm 163,84 \text{ mV}$ équivaut à $\approx \pm 82 \text{ A}$ de dynamique théorique ; à 10 A le shunt ne dissipe que $0,2 \text{ W}$ sur 5 admissibles.

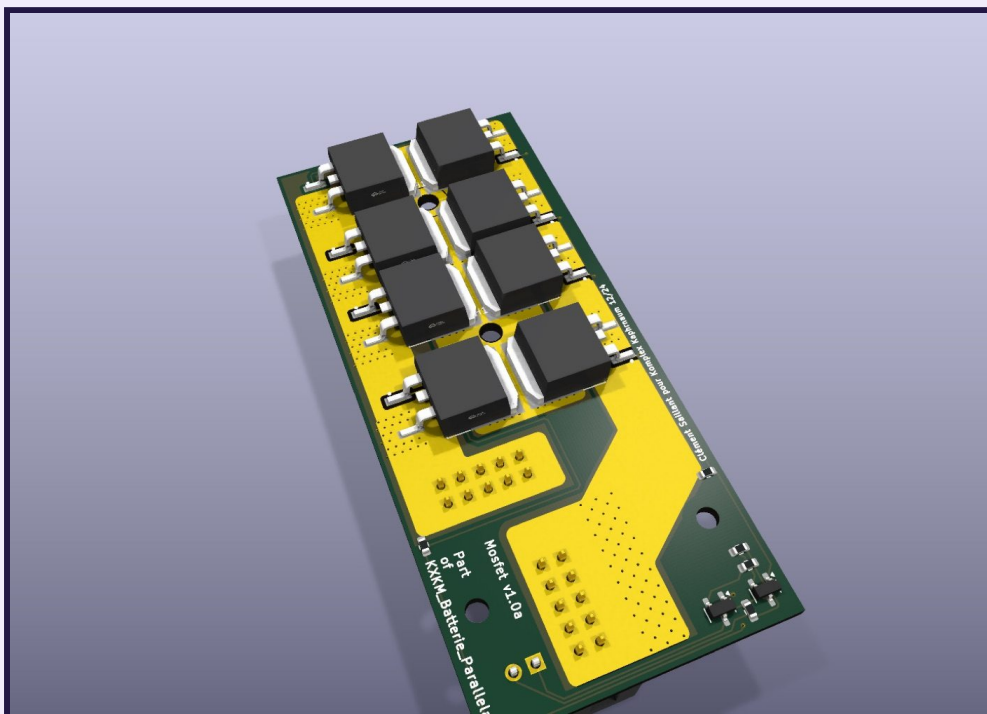
L'alerte câblée en dur

- ◆ Les seuils **BOVL = 30 V / BUVL = 24 V** sont programmés dans l'INA237 à l'init : le comparateur matériel du chip surveille même si le firmware est occupé.
- ◆ La broche **ALERT** (pull-up 10 k) remonte vers le TCA9535 (P0.4-P0.7) – lue en polling, l'INT du TCA n'étant pas routé vers le maître.

- ◆ **VBUS** lit la tension pack en amont du shunt ; l'ADC tourne en continu – conversion 540 μ s, **64 moyennes matérielles**.
- ◆ Calibration firmware : LSB courant $\approx 305 \mu\text{A/bit}$ (I max 10 A), **SHUNT_CAL ≈ 500** ; VBUS à 3,125 mV/bit.

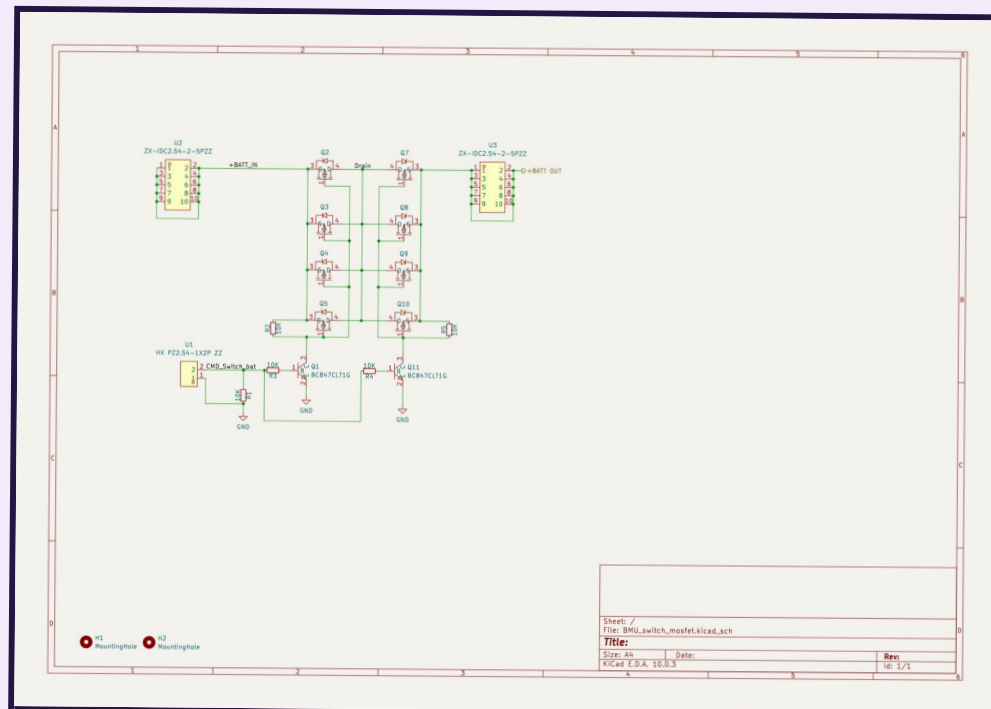
- ◆ Lecture V+I **atomique** sous un seul verrou I2C ; sorties initialisées à NAN – un échec de lecture ne laisse jamais une donnée fantôme.
- ◆ Anti-aberration : rejet des sauts $> \pm 30 \%$ (glitches I2C observés type V/2, V $\times 1,4$) et des valeurs impossibles ($> 35 \text{ V}$, $> 50 \text{ A}$).

Le point safety central du parallélisme : un seul MOSFET « coupé » conduit quand même dans un sens, par sa diode de corps. La BMU monte donc deux groupes de 4 IRF4905 **back-to-back**, drains communs – diodes de corps opposées, **blocage bidirectionnel** réel.



La sous-carte (38 × 85,5 mm, 2 couches) : 8× IRF4905 en D2PAK, deux groupes de 4 tête-bêche sur cuivre nu – dissipation et section de courant ; drivers SOT-23 en bas à droite.

rendu kicad-cli



Q2-Q5 || amont, Q7-Q10 || aval, drains réunis ; commande par BJT, grilles tirées vers GND pour fermer.

BMU_switch_mosfet.kicad_sch

IRF4905 – P-CHANNEL 55 V / 74 A

4 en parallèle par direction : $R_{DS(on)}$ divisée par 4, marge thermique confortable pour 10 A nominal par voie.

COMMANDE HIGH-SIDE SIMPLE

Un BC337 par groupe : CMD haut $\rightarrow$ grilles tirées à GND $\rightarrow V_{GS} \approx -V_{bat} \rightarrow$ ON. Pull-up 10 k grille-source pour l'état OFF. Coupure en microsecondes.

ENFICHABLE = REMPLAÇABLE

2 embases IDC 2×5, les 10 contacts en parallèle sur chaque net de puissance. Une voie en panne ? On change la sous-carte, pas la carte mère.

ÉVOLUTIF EN TENSION – VARIANTE 48 V DESSINÉE

La chaîne de mesure INA237 accepte **+85 V** de mode commun : c'est la sous-carte qui fixe le plafond. La déclinaison 48 V (packs 13s, 54,6 V max) est à l'étude : **IRF5210** (100 V, même boîtier D2PAK – drop-in), clamp zener V_{GS} 12 V + R série, BJT de commande 300 V, buck Manual ON à passer en 100 V. Schéma ci-dessous, note de design dans le repo.

⚠ POINT DE VIGILANCE RELEVÉ

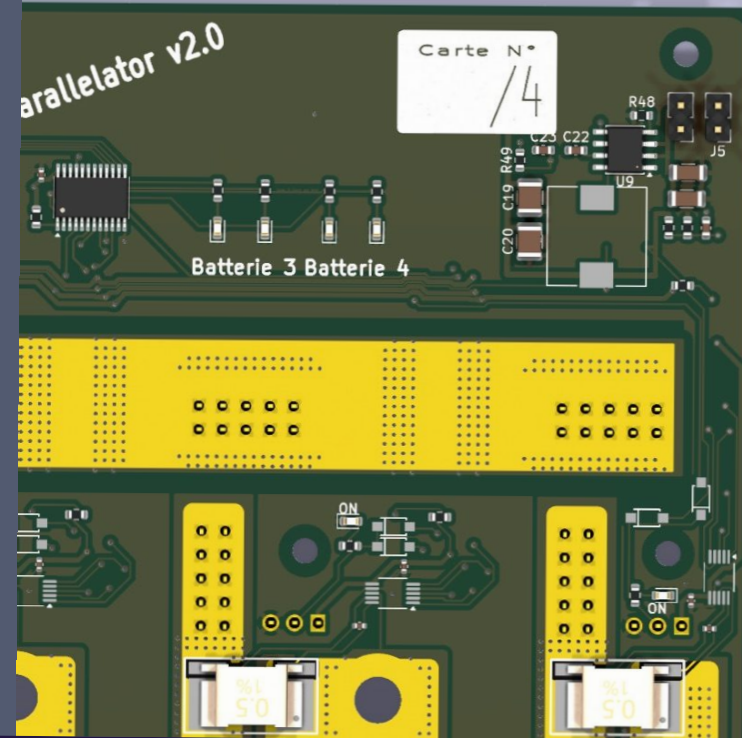
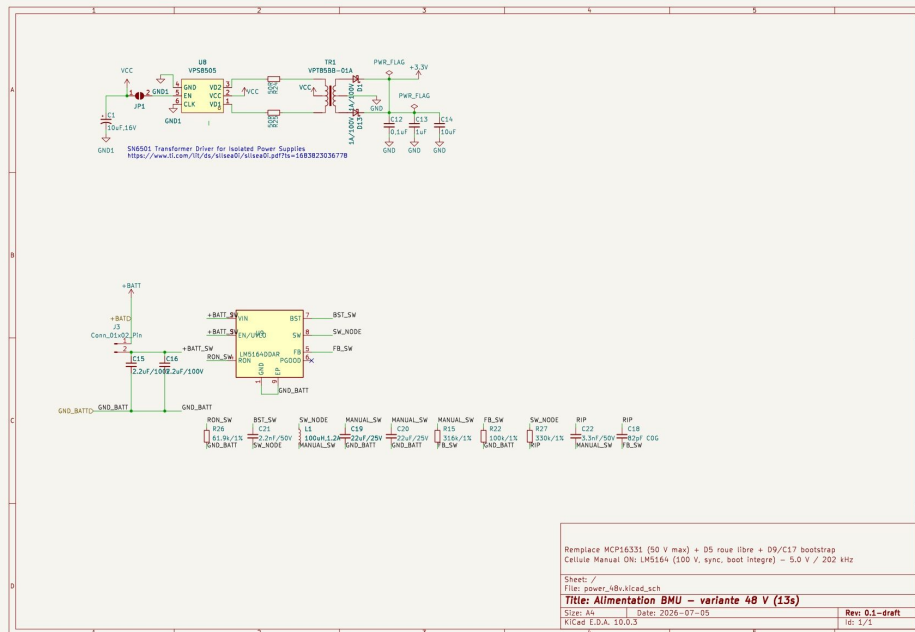
V_{GS} atteint $-24/-30$ V, au-delà du ± 20 V absolu max de l'IRF4905, sans zener de clamp ni résistances de grille individuelles. Fonctionne en statique, mais fragilise les MOSFETs – candidat d'amélioration v3.



BMU_switch_mosfet_48v.kicad_sch



Le PCB routé :
R6/R7 insérées
en série dans les
lignes de grille,
D1/D2 au plus
court des rails –
DRC au niveau
du baseline,
connectivité 100
%.

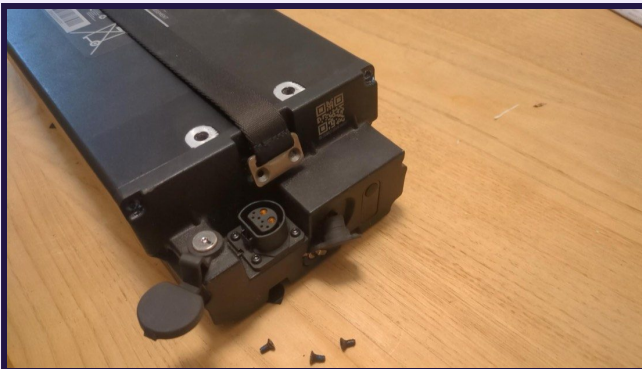


Et son layout sur la carte mère v2.1 : U9 en HSOP-8 dans le corridor libéré, R48 (RON), C22 de bootstrap, self 10×10, COUT 1210 et rangée feedback re-routés – DRC au niveau du baseline de production, 0 pad non connecté.

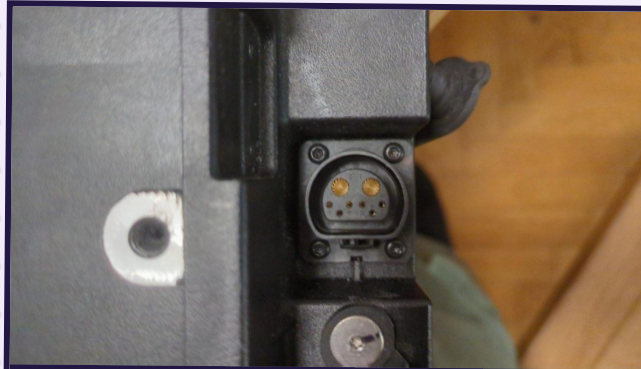
BMU_v2_48v.kicad_pcb · coin haut-droit

Côté carte
mère, la
cellule «
Manual ON »
redessinée :
LM5164 (100
V, synchrone,
5,0 V / 202
kHz) remplace
le MCP16331
(50 V max) – la
roue libre et la
diode de
bootstrap
disparaissent,
entrée en
2×2,2 µF/100
V, réseau
ripple type 3.

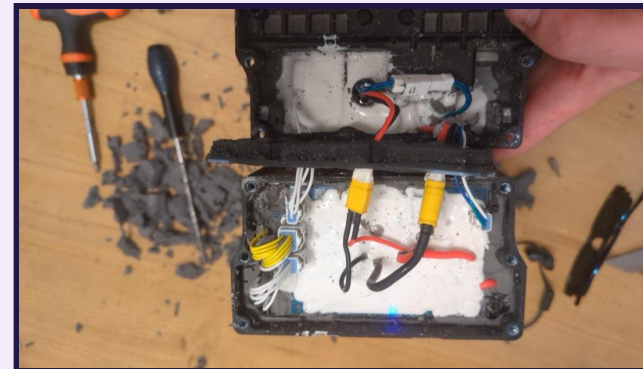
Le pack 13s sous la loupe



Le pack cible : Ninebot 13s – 46,8 V, 24,5 Ah, 1 147 Wh – récupéré de trottinettes en fin de service.

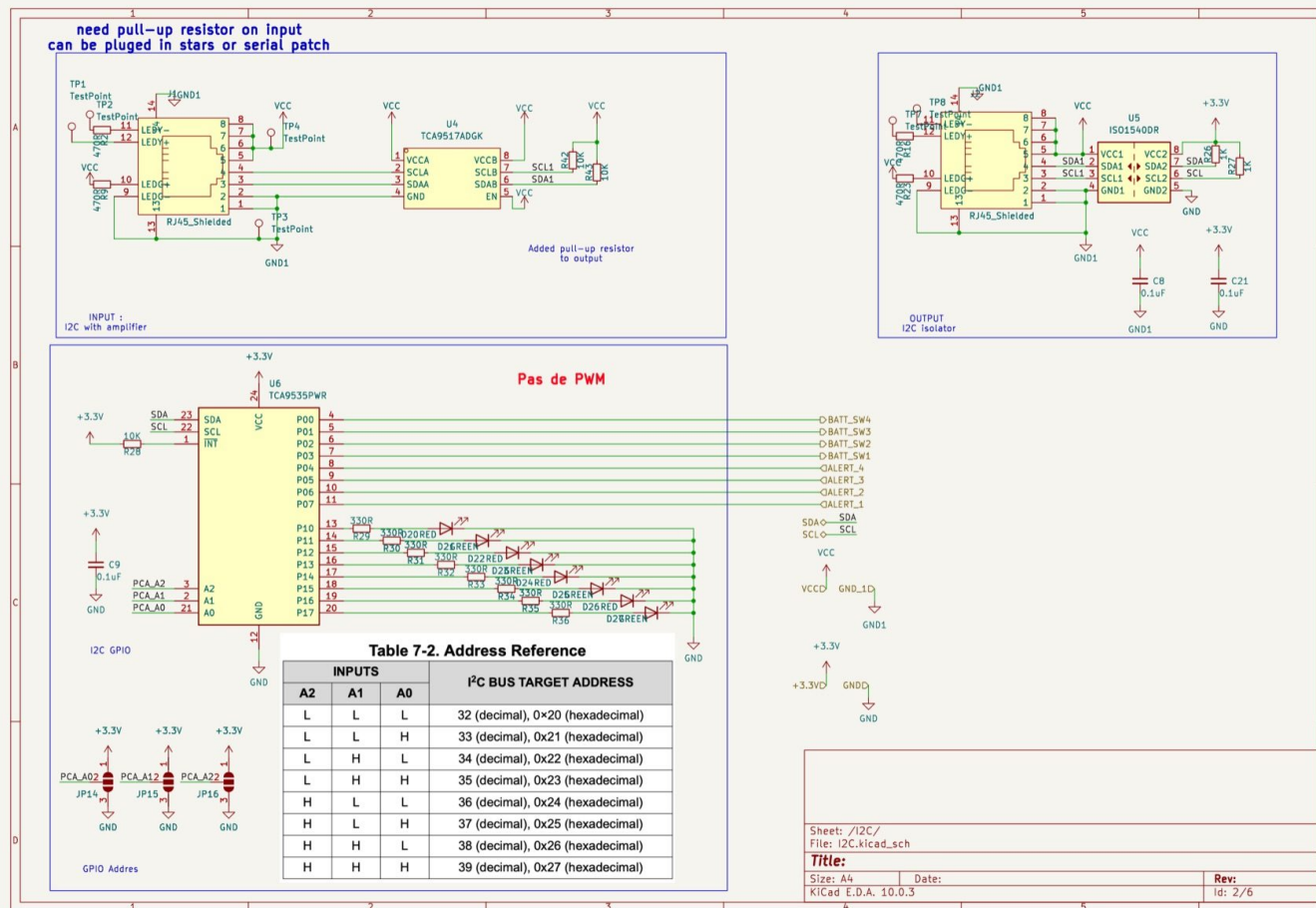


Ports distincts au connecteur : 2 broches de puissance + signaux. Charge, décharge et communication séparées – le comportement en parallèle reste à caractériser.



Le BMS interne, noyé dans le silicone (et toujours vivant – LED bleue). C'est lui qui décidera si le backfeed passe : risque n°1 du scénario 48 V.

Relier 16 batteries à un même bus de données, c'est créer 16 boucles de masse potentielles. La BMU isole galvaniquement chaque carte : le bus RJ45 vit dans son propre domaine électrique.



La feuille I2C : RJ45 + buffer TCA9517 (domaine bus VCC/GND1) → isolateur ISO1540 → domaine local +3,3 V. Le TCA9535 pilote 4 commandes, lit 4 alertes INA, allume 8 LEDs.

I2C.kicad_sch · cliquer pour zoomer

TCA9517 – LE MUSCLE

Buffer/répéteur I2C en entrée de chaque carte : retend les fronts sur le câblage long. Bus ralenti à **50 kHz** (« fiable sur câblage long » – commentaire du firmware).

ISO1540 – LA BARRIÈRE

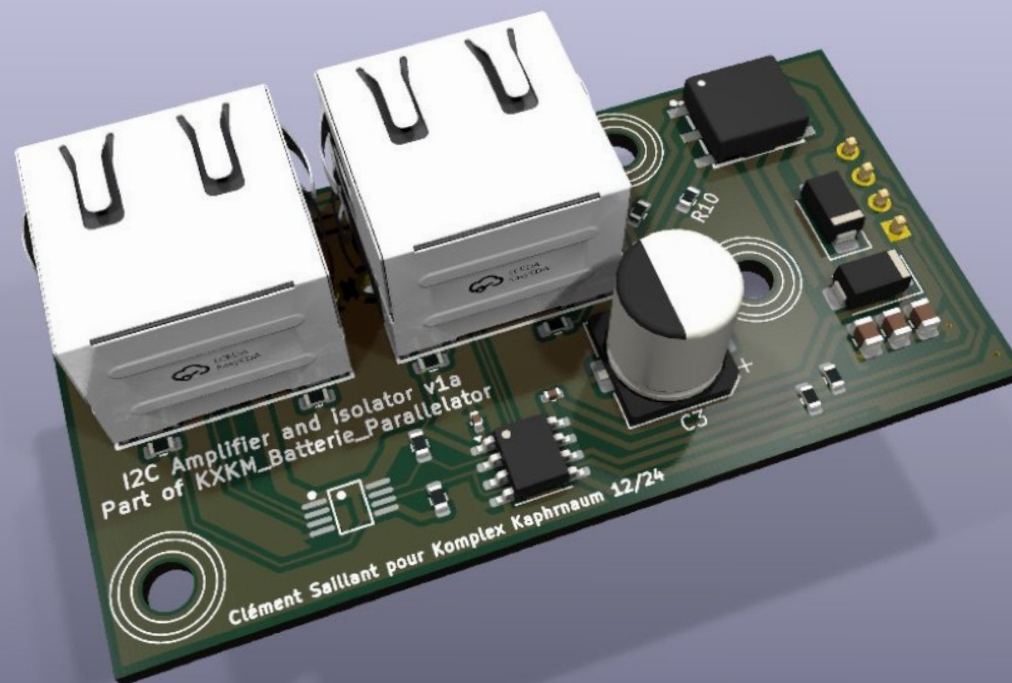
Isolateur I2C galvanique entre le domaine bus (VCC/GND1, véhiculé par le RJ45) et le domaine local (+3,3 V flottant, référencé au – du pack local).

ALIM ISOLÉE À TRANSFO

Driver push-pull VPS8505 + transformateur VPT85BB-01A + redressement Schottky : le 3,3 V local est fabriqué à travers l'isolation. Aucun retour de masse entre packs.

TÊTE DE BUS « I2C REPEATER »

Petite carte dédiée (62,5 × 31 mm) côté ESP32-S3-BOX-3 : mêmes ISO1540 + TCA9517 + alim isolée, 2 RJ45 pour partir en chaîne ou en étoile.



La tête de bus « I2C Amplifier and Isolator » : 2 RJ45 blindés (chaîne/étoile), transformateur d'isolation et son driver, ISO1540, réservoir de filtrage.

rendu kicad-cli · I2C_repeter.kicad_pcb

Sur une installation en exploitation, une BMU en panne ne doit pas couper l'alimentation. Un simple header deux points (J3 – Switch Manual ON) force toutes les voies fermées, **sans MCU, sans bus, sans firmware.**

Comment ça marche

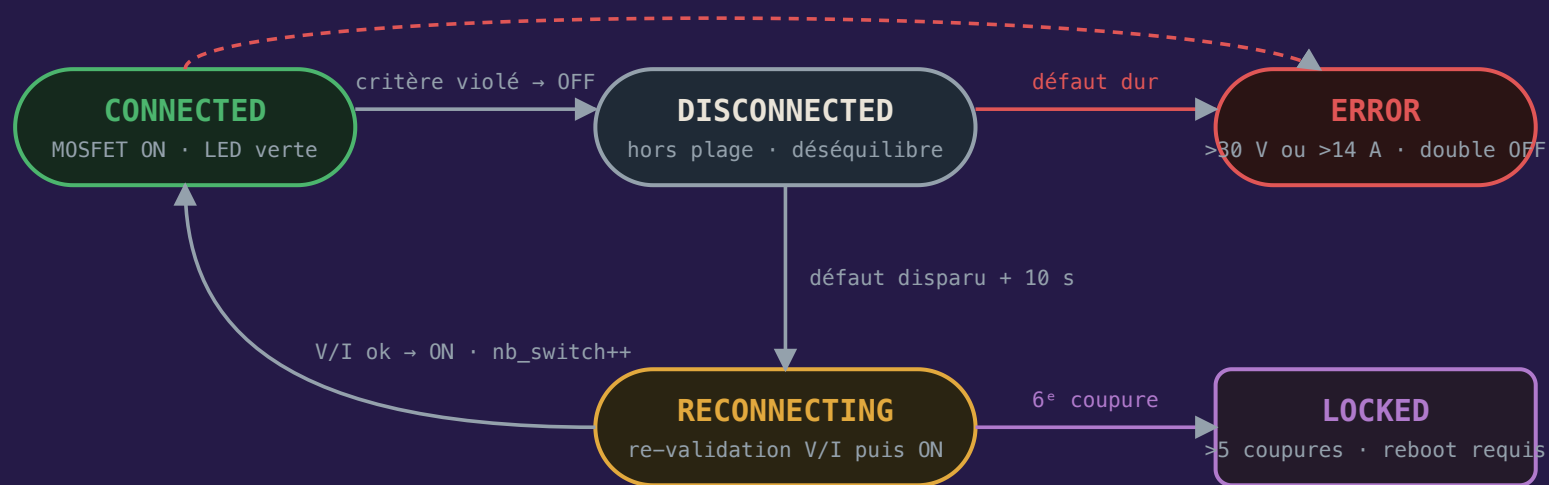
- ♦ Un buck dédié **MCP16331** (entrée jusqu'à 50 V) tire ≈ 5 V directement du bus +BATT 24-30 V.
- ♦ Ce rail /MANUAL_SW attaque chaque commande de voie par une **diode-OR** (1N4148W) avec la sortie du TCA9535.
- ♦ Fermer J3 = toutes les commandes à l'état haut = tous les MOSFETs ON. La protection disparaît, l'alimentation reste.
- ♦ En v1 c'était un solder jumper (fer à souder requis) ; en v2, un header actionnable sur le terrain, à la main.

Triple signalisation par voie

-  verte fixe – connectée
-  rouge fixe – déconnectée / verrouillée
-  rouge clignotante ~ 1 Hz – défaut dur
-  bleue – témoin hardware « commande ON »

La paire rouge/verte est pilotée par le TCA9535 (état logiciel) ; la LED bleue est branchée *directement* sur la ligne de commande – elle dit la vérité matérielle, y compris en Manual ON. Les jacks RJ45 ont leurs propres LEDs d'activité bus.

Le composant `bmu_protection` (ESP-IDF 5.4) tourne en tâche FreeRTOS priorité 8, période 200 ms, nourrie au watchdog. Chaque cycle : lecture V/I des 16 voies, décision, commutation.



Ordre d'évaluation (par voie)

- ♦ **0.** Topologie invalide → fail-safe all OFF (jamais rallumé tant que `Nb_TCA×4 ≠ Nb_INA`)
- ♦ **1.** Filtre anti-aberration ($\pm 30\%$, bornes physiques)

Et autour de la machine

- ♦ **Soft-balancing** : pack > 200 mV au-dessus de la moyenne pendant 3 cycles → duty-cycling $\sim 60\%$ (3 ON / 2 OFF), minimum 3 packs connectés. La protection a veto sur chaque demande.

- ♦ **2.** Défaut dur : $V > 30\text{ V}$ ou $|| > 14\text{ A}$ (1,4×) → **ERROR**, OFF immédiat + double-off
- ♦ **3.** $V < 1\text{ V}$ → pack absent → **DISCONNECTED**
- ♦ **4.** $\text{nb_switch} > 5$ → **LOCKED** permanent
- ♦ **5.** $V \notin [24 ; 30]\text{ V}$ ou $|| > 10\text{ A}$ → OFF réversible
- ♦ **6.** Déséquilibre $> 1\text{ V}$ vs max flotte, confirmé **3 cycles** → OFF
- ♦ **7.** Tout est bon → reconnexion possible après 10 s
- ♦ **R_int opportuniste** : chaque coupure sous charge mesure gratuitement $R_{\text{ohmique}} = \Delta V / I$ à +100 ms et R_{totale} à +1 s. Alerte au-delà de 50/100 mΩ.
- ♦ **SOH embarqué** : réseau FPNN quantifié INT8 (11,7 Ko, TFLite Micro) – état de santé par pack toutes les 10 s, sur l'ESP32.
- ♦ **I2C robuste** : mutex global à héritage de priorité, 5 échecs consécutifs → reset du bus, score de santé par capteur (critique < 30 → voie forcée OFF).

⚠ **Écart doc/code assumé** : le README annonce un backoff exponentiel de reconnexion – le code (IDF et legacy) implémente en réalité un **délai fixe de 10 s** + compteur + verrouillage au 6^e essai. Même transparence pour le timestamp InfluxDB direct (non branché sur SNTP, horodatage délégué à Telegraf) et l'override NVS du broker MQTT (écrit mais non consommé par le client).

ÉCRAN LVGL SUR LA BOX-3

5 onglets (Batt, SOH, Sys, Alert, Config) à 2 Hz : grille des 16 voies, V min/moy/max du pack, graphes 5 min, seuils réglables aux steppers, mode nuit à 30 s.

BLE CHIFFRÉ + APP IOS

4 services GATT (batteries, système, contrôle, Victron) – toute écriture exige un lien chiffré et repasse par la machine de protection. App SwiftUI 3 rôles (admin / technicien / viewer), PIN + Face ID, cache offline.

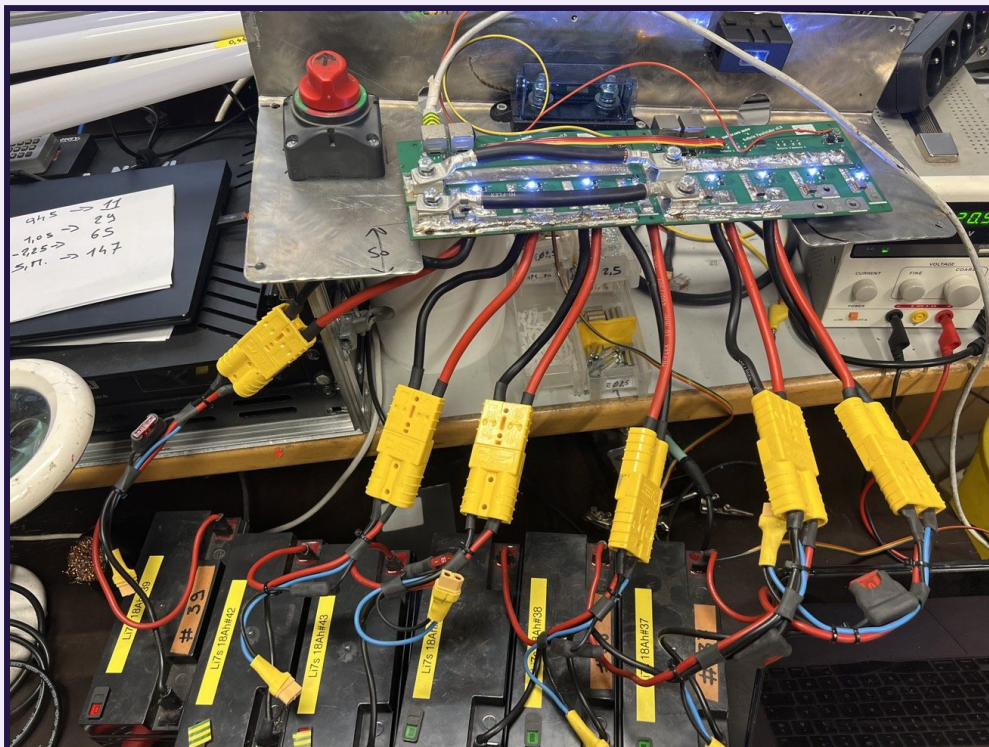
ÉCOSYSTÈME VICTRON

La BMU se fait passer pour un SmartShunt : advertising « Instant Readout » chiffré AES-CTR + GATT compatible VictronConnect. Elle scanne aussi les vrais équipements Victron (MPPT solaire en VE.Direct).

TÉLÉMÉTRIE RÉSILIENTE

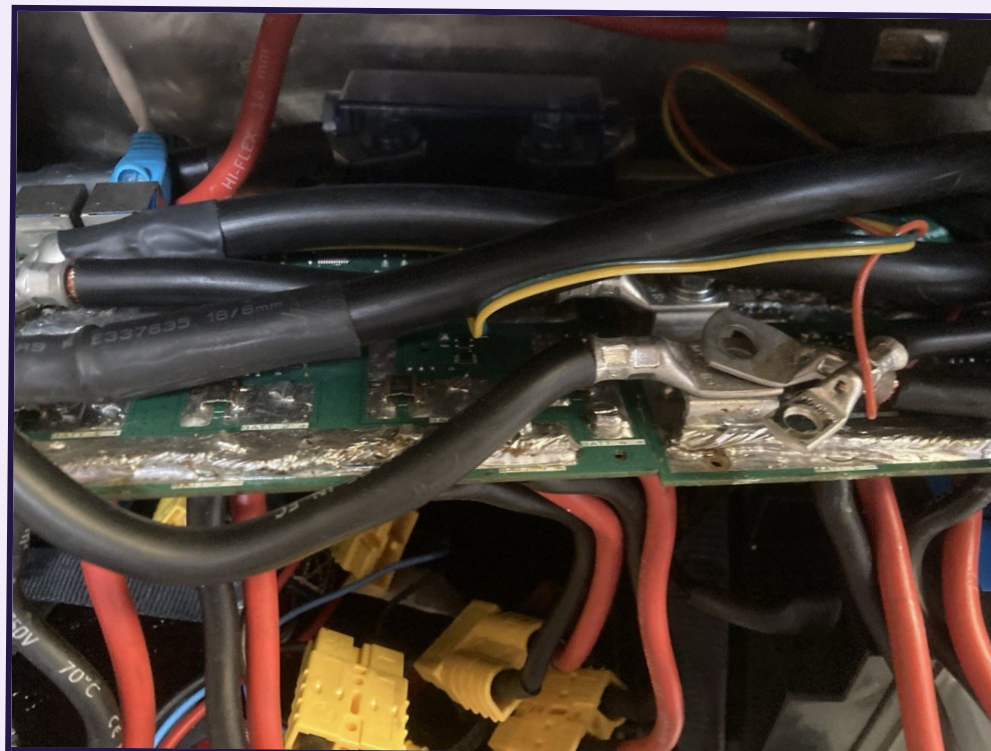
MQTT → Telegraf → InfluxDB → Grafana (docker sur serveur dédié). WiFi coupé ? Les mesures s'accumulent en flash FAT (2 × 512 Ko en rotation) et sont rejouées à la reconnexion.

... et maintenant sur le banc – gate S3 en cours



La carte v2.0 sous tension sur des packs Li-ion 7s 18 Ah (Anderson, coupe-batterie + porte-fusible en amont, alim de labo en source) – les LEDs bleues « commande ON » confirment les voies actives.

photo banc



Le détail qui explique le cuivre nu : zones rechargées à l'étain (tresse noyée) et cosses boulonnées sur les pastilles – la section des 4 couches est doublée par l'apport de soudure.

photo banc

- ◆ **26 tests** host (13 PlatformIO sim-host + 13 suites ESP-IDF) : machine de protection, sécurité web, codecs télémétrie, GATT Victron, R_int – zéro matériel requis.
- ◆ **4 pipelines CI** avec gates mémoire : flash ≤ 85 % de la partition OTA 2 Mo (actuel : 81 %), RAM ≤ 75 %.
- ◆ **25 findings d'audit résolus** (migration + audit approfondi + infra, 2026-04-07) : mutex I2C, races, deadlock, XSS, unités mV, MQTT authentifié...
- ◆ Réécriture **Rust no_std** de la couche protection en cours (5 crates, 10 tests host, FFI préparée) – même logique, memory-safety en plus.

Reste ouvert

- ◆ Gate **Kill_LIFE S3** : validation terrain (banc L3 : alim programmable + charge)
- ◆ Audit 2026-06-13 : 3 points de concurrence hotplug (H3/H4/H13) documentés, refactor en attente de banc
- ◆ Hardware v3 candidat : clamp V_{GS} des IRF4905, résistances de grille, exploitation de l'INT du TCA9535, variante 48 V : sous-carte dessinée et routée (IRF5210) + carte mère v2.1 complète – schéma intégré et coin buck LM5164 re-routé (DRC au baseline) ; reste le banc

	BMU V1 (FABRIQUÉE)	BMU V2 (PRÊTE PROD)
Coupure	low-side (le –), IRFZ44N N-ch TO-220 sur carte mère	high-side (le +), 8x IRF4905 back-to-back sur sous-carte
Blocage	unidirectionnel	bidirectionnel
Maintenance	dessouder	déficher la sous-carte
Manual ON	solder jumper	header terrain J3
Dimensions	193,5 × 105 mm	170 × 100 mm
Isolation I2C	identique – ISO1540 + alim transfo déjà en v1	

Un GND commuté (v1) casse la référence de masse de la voie isolée ; passer le commutateur côté + avec un GND commun (v2) est plus sain – et le back-to-back règle la body diode.



LES FICHIERS DU HARDWARE

Schémas, PCB, sous-carte MOSFET, répéteur I2C
et modèles 3D – projet KiCad complet, GPLv3.

git.saillant.cc/electron/KXKM_Batterie_Parallelator

Dossier technique 2026 · sources : schémas KiCad v2, firmware ESP-IDF 5.4, specs Kill_LIFE, gerbers JLCPCB

L'Electron Rare · GPLv3