

Notes de Lectures: Thèse de Steven Varoumas, ”High-level programming models for microcontrollers with scarce resources”

Hector Suzanne

Préliminaires

Où une étude de la structure matérielle des microcontrôleurs et de l'état de l'art de leur programmation justifie la création d'une machine virtuelle pour OCaml à faible ressource pour la programmation concurrente avec vérification formelle

Les microcontrôleurs

Les microcontrôleurs (mC) sont caractérisés par une puissance de calcul et un prix inhabituellement faible dans le marché des années 2010-2020: de l'ordre de 10^7 instructions par secondes sur 8 ou 16 bits, quelques kilo-octets de RAM, et quelques dizaines de kilo-octets de mémoire flash, plus-ou-moins en lecture seule. L'entrée sortie se compose de quelques dizaines de signaux binaires ou analogues, les *broches*, et d'un système d'horloge et d'interruptions pour les prendre en compte. Ils sont typiquement utilisés dans un contexte embarqué, sans système d'exploitation (en *bare metal*). Les prix varient de 0.1€ à 10€.

On dénombre quatre grandes architectures et jeux d'instructions associés pour les microcontrôleurs: AVR, PIC, ARM et Intel 80xx. La plateforme AVR connaît un gain de popularité depuis quelques années grâce notamment à Arduino et assimilés, des plateformes de développement ”tout-compris” appréciées des amateurs. PIC est principalement munie d'outils propriétaires avec support adéquat, et ARM tient le haut du panier en terme de puissance et de capacité mémoire, et est donc plus chère.

La programmation de microcontrôleur se fait généralement avec des langages de bas-niveau: assembleur ou C (en vérité des sous-C), dotés parfois de macros augmentant la *quality of life* du programmeur. La connaissance du matériel et la maîtrise fine des ressources mémoires priment avant tout, en on en vient à apprécier les capacités ”haut niveau” de C telles qu'elles avaient été appréciées par les programmeurs des années 80. La portabilité des programmes en souffrent car les API et jeux d'instructions sont rarement compatibles, et la stabilité

légendaire des programmes ASM et C est de mise, et peut causer des pannes et des destructions de matériel.

L'environnement de développement, quand il n'est pas fourni par le fabricant *via* une licence propriétaire, est souvent peu adapté à la création de projets complexe et de programmes sûrs: comme la dynamique du programme est étroitement liée à celle du système dans lequel il est embarqué, la simulation du programme demande de simuler l'électronique qui l'entoure. La connaissance des domaines experts du projet en cours est conseillée, et décourage plus d'un amateur. Le débogage sur machine est possible via un port série, et devient une tâche ingrate et chronophage, où l'on est la victime d'erreurs longtemps oubliées dans les contrées plus verdoyantes de la programmation haut niveau.

Gravir l'échelle de l'abstraction

Les programmeurs "normaux", eux, on depuis un certain temps abandonné l'assembleur, et l'on commence à observer la déréliction lente de C dans l'*userspace*. En s'extrayant de la correspondance entre calcul et machine, des outils comme le typage statique, la gestion automatique de mémoire, ou encore le débogage symbolique, ont permis un gain de productivité et de *quality of life* des programmeurs de systèmes complexes, tout en offrant de plus en plus de garanties formelles du bon fonctionnement des programmes. On souhaite donc, ne serait-ce que par charité, faire profiter aux programmeurs des microcontrôleurs de ces mêmes avancées. Certain s'y sont essayé, et l'on fait un tour de l'état de l'art de la programmation haut-niveau sur ces "basses-machines" qui sont notre sujet.

Compiler le code de haut-niveau, ça consiste à descendre l'échelle de l'abstraction pour finir sur le métal, en *code objet*. On lie ensuite les différents bouts de programme ensembles pour former un exécutable. La difficulté de la compilation vers microcontrôleur, c'est le manque d'expressivité du code-objet: le métal encore plus bas qu'à l'habitude. Des langages comme C++, qui ont pris soin de ne pas prendre leur lien avec le matériel, se compilent plutôt bien avec des outils propriétaires ou des compilateurs basés sur GCC. Mais en restant fidèle à son métal, C++ n'apporte pas les garanties que d'autres langages de haut-niveau offrent, en premiers la gestion mémoire automatique et le typage statique fort. La plateforme modulaire de compilation LLVM supporte ou à supporté des architectures de microcontrôleurs, permettant de compiler des sous-langages de *Rust* ou *Go* vers AVR ou PIC. Mais les progrès sont lents: le métal est *très* bas après tout.

Pour palier à ce problème, on peut utiliser une machine virtuelle. Cela consiste, si l'on pousse l'analogie, "faire remonter le métal". Le code source est compilé vers un *code-octet* (ou *bytecode*), compréhensible par un programme interprète qui sert donc de machine proprement virtuelle. Cet interprète est implémenté pour avec les langages de bas-niveau. Comme passer du métal au système complexe (coder en C) est trop complexe, et que passer du haut-niveau vers le

microcontrôleur l'est aussi, on les fait se rencontrer à mi-chemin. On a aussi l'avantage de pouvoir choisir le terrain d'entente: le code-octet n'a pas à obéir au lois du métal, ni à être élégant pour le programmeur. On bénéficie d'une vraie représentation intermédiaire. Les programmes en code-octet, plus la machine virtuelle, sont souvent plus petits que les équivalents en C, ce qui est un avantage indéniable quand on travaille sur peu-ou-prou sur 24ko de mémoire programme. Plusieurs machines virtuelles ont été portées sur microcontrôleurs:

Java Parmi les efforts de création de machine virtuelle (VM) pour microcontrôleurs, on note en premier Java. Dès ses débuts, la JVM, développée *avec et pour* Java constitue un avantage du langage de Sun (puis Oracle): "*Write once, run everywhere*". Java dispose d'un vrai système de type avec sous-typage nominal et d'une riche bibliothèque de classes disponible n'importe où la JVM l'est. Le langage Java seul a été compilé via la JVM pour tourner sur 1ko de RAM et 16ko de mémoire flash. Mais si on inclut le ramasse-miette de la JVM, la fameuse bibliothèque standard et les threads, on passe à 24ko de RAM et 128ko de ROM minimum...

Python *MicroPython* permet de faire tourner du code Python 3 sur des microcontrôleurs ARM à grande capacité: on parle de 256ko de ROM et 16ko de RAM. Elle offre l'accessibilité de Python sur microcontrôleur et même un REPL distant, évaluant sur la machine hôte les commandes entrées depuis l'ordinateur du programmeur. Mais si on passe à des tailles de contrôleur plus modestes, le bât blesse. En dessous de 8ko de RAM, seuls des sous-parties de Python 2.5 ont été portées, et ce sans bibliothèque standard. Python est connu pour faire un usage important des ressources machine pour fournir une programmation multi-paradigme hautement dynamique.

Scheme Le dérivé fonctionnel de Lisp possède un grand pouvoir expressif à l'aide des *macros* et du support de premier ordre des *continuations* comme valeurs. Le langage est défini par standard et de nombreuses implémentations existent, dont certaines, comme *Guile* du projet GNU, utilisent une VM. On peut ainsi exécuter sur PIC des programmes Scheme conformant au standard 4 du langage à partir de 8ko de RAM, et une sous-partie du standard 5 a été implémenté ne demandant que 1ko de RAM et 6ko de ROM.

OCaml OCaml fait intervenir sans son pipeline de compilation classique un bytecode pour la machine virtuelle ad-hoc *ZAM*, qui est au cœur de son interpréteur. Elle se compose uniquement de 148 instructions, qui permettent d'implémenter le styles de programmation objet, fonctionnel, modulaire et impératif. OCaml dispose aussi d'un typage statique fort et d'inférence de type. Le projet *OCaPIC* permet d'exécuter *l'intégralité* du langage dans seulement 4ko de RAM et 64ko de ROM sur le silicium PIC. Elle permet aussi d'optimiser le code OCaml pour les besoins spécifiques des microcontrôleurs.

Nous considérons que l'approche d'OCaPIC est la plus pertinente pour per-

mettre la programmation de haut niveau sur microcontrôleur. La légèreté de la VM d'OCaml permet une implémentation complète du langage, et OCaml dispose d'un typage statique fort et d'une gestion automatique de la mémoire par ramasse-miette. Afin d'élargir la compatibilité notre travail au delà d'une seule architecture, pour décidons d'implémenter une machine virtuelle générique à empreinte mémoire faible et bonne performances.

Programmation Synchrones

Les microcontrôleurs font souvent partie de systèmes en *temps réels*, parfois critiques. Leur rôle y est d'orchestrer le comportement des différents composants électroniques du système sous des contraintes de latence fortes. Cette orchestration est inhéremment concurrente, et induit donc une notion d'*ordonnancement* des tâches dans le microcontrôleur au modèle d'exécution séquentiel. Si l'on peut borner statiquement le temps minimum entre deux événements que le microcontrôleur doit prendre en compte, alors l'ordonnancement peut être réalisé statiquement. Sinon, l'on fait appel à un ordonnanceur: un composant d'un *Real-Time Operating System (RTOS)* qui donne la main aux différentes tâches en fonctions des signaux extérieurs et des priorités internes relatives. Mais ces RTOS ne sont que peu voire pas compatibles avec les faibles ressources des microcontrôleurs considérés ici. De plus, des erreurs de concurrences peuvent encore avoir lieu en présence d'un bon ordonnancement, et peuvent bloquer des tâches prioritaires.

Mais un autre modèle de concurrence permet de sauver la mise: la *programmation synchrone*. Ce paradigme éprouvé dans le monde industriel se passe de machinerie ordonnancière en garantissant statiquement le dit ordonnancement de manière déterministe. Cette approche légère nous semble particulièrement adaptée à la création de logiciels pour microcontrôleur, sans OS et avec peu de ressources. Elle repose sur l'*hypothèse synchrone*:

Le temps de latence engendré par le calcul des sorties à partir des entrées est négligeable.

En d'autres termes, le temps de synchronisation du microcontrôleur avec son environnement est nul. C'est le même genre d'hypothèse que font les concepteurs de circuits électriques (*le flux d'électron est instantané*), ou dans la gravitation newtonienne (*les interactions entre corps sont sans délais*). C'est une hypothèse bien sur: il ne faut jamais négliger sans bonne raisons (on y reviendra avant la fin du chapitre, promis). Sous l'hypothèse synchrone, la réaction du microcontrôleur se fait donc en un instant qui se répète régulièrement, et que l'on nomme *instant synchrone*. Le déroulement du programme suit alors une boucle: on lit les entrées, on calcule les sorties *en un instant*, on les écrits, et on recommence. Avec la programmation synchrone, on a simplifié la concurrence: plus besoin pour le programmeur de réfléchir manuellement à la *synchronicité* des composants entre eux.

La programmation synchrone est arrivée dans les laboratoires français dans les années 80, où ont été produit deux grandes familles de langages synchrones: ceux à *flux de contrôle* et ceux à *flux de données*. Dans les langages synchrones à flux de contrôle, un programme est composé de plusieurs modules possédants chacun leurs propres entrées/sortie et une boucle interne. Les événements en entrées débloquent la boucle, qui produit des événements en sortie. Il y a ainsi un *flux de contrôle* passant de module en module. Les langages *Esterel* et *ReactiveML* sont membres de cette famille, utilisés dans les applications musicales, les jeux vidéos, les simulations physiques, et plus récemment la programmation web.

En programmation synchrone à *flux de données*, tout est un flux temporel de valeurs de type constant. Les *noeuds* du programme lient déclarativement, par des équations, les flux en entrée et ceux en sortie. Durant un instant synchrone, tous les flux sont mis-à-jour, faisant de ces programmes des cas particuliers des *processus par réseaux de Kahn* pouvant communiquer *sans mémoire tampon* (c'est important). Les programmes synchrones utilisent des opérateurs spécifiques pour avoir accès aux valeurs d'instants passés, de pousser des valeurs dans le futur d'un flux, et de bloquer leur flux en l'attente d'une condition. Ces blocages induisent des *horloges* dans chaque flux, et les valeurs n'existent que quand les horloges le prescrivent: toutes les valeurs ne sont pas calculées à tous les instants. Le programme synchrone se compile en une boucle simple, qui fait tout par instant, parfois même sans allocation dynamique. Dans la famille synchrone à données, on note *Lustre*, *Signal* et *Lucid*. On y ajoutera la notre, ayant choisi ce paradigme de programmation adapté au monde de l'électronique et peu gourmand en ressource.

Sûreté des programmes

Les applications de ces langages sont nombreuses dans l'industrie de haut-niveau. La plateforme industrielle *SCADE* regroupe la programmation synchrone avec un éditeur de programme visuel et un générateur de code certifié. Cela permet de faire conformer les systèmes aux normes internationales draconiennes qui régulent l'industrie du transport ferroviaire et aérien, et celui de l'énergie.

En effet, toute défaillance d'un système embarqué dans ces applications peut causer des accidents pouvant aller jusqu'à mort d'homme (pensez aux contrôleurs des centrales nucléaires). Dans ces *systèmes critiques*, la sûreté des systèmes, c'est à dire la garantie que des classes de comportement indésirables soient impossibles, est l'enjeu majeur. Cependant, la programmation de microcontrôleur se fait encore dans des langages offrant peu ou pas de garanties de sûreté. Notre intérêt dans cette thèse est donc de garantir des propriétés fortes de sûreté pour les programmes synchrones à flux de données sur microcontrôleurs, en se basant sur l'analyse statique et le typage, en spécifiant formellement nos outils et en développant une méta-théorie associée.

Le typage statique nous permet de garantir l'absence d'une grande classe d'erreurs classiques, comme le déréférencement de pointeur nul, la réalisation

d'actions physiques indésirables, la destruction de composant. Par exemple, on utilisera les GADT d'OCaml pour garantir certaines interactions de bas niveaux correctes, et ce sans coût à l'exécution.

L'analyse statique nous permettra d'éclairer la validité de l'hypothèse synchrone (voilà notre promesse tenue). On rappelle que pour qu'un programme synchrone fonctionne, il faut pouvoir négliger le temps de calcul de l'instant synchrone face au temps de réponse exigé par le système qui embarque le programme. Il faut garantir, que dans le pire des cas possible, le temps de calcul reste acceptable. Ce *Worst Case Execution Time (WCET)* est la plupart du temps estimé empiriquement comme la borne supérieure du temps d'exécution dans un banc de test se voulant représentatif. Mais on rappelle que la représentativité est le seul idéal auquel ses tests peuvent espérer: il est impossible de tester sur tout l'espace de recherche, même pour des microcontrôleurs ($2^{8 \text{codeRAM}} = 10^{2400}$ cas possibles). Il est donc nécessaire de faire appel à un raisonnement statique pour garantir le WCET, quitte à rejeter certains programmes subtilement corrects.

On peut borner le WCET d'un programme en générant son graphe flux de contrôle, puis en extrayant des contraintes linéaires du pire chemin dans ce graphe, que l'on maximise par programmation linéaire. Une autre approche basée sur la syntaxe consiste à borner co-inductivement les WCET de parties de plus en plus grandes du programme jusqu'à avoir une borne sur le programme complet. Dans tout les cas, ce calcul de WCET est rendu hautement complexe par l'usage dans les processeurs modernes de techniques d'optimisation de corrections douteuses, comme des pipelines de l'ordre de 100 instructions, des prédictions de branchement, ou des caches dans des caches dans des caches... Heureusement, la simplicité du matériel des microcontrôleurs nous sauvegarde de ce genre de problèmes. Le calcul de WCET en vrai temps physique y est concevable.

La formalisation de nos méthodes permettra de garantir la sûreté des programmes et leurs WCET. Elle se fait avec des outils comme *Coq* ou *Isabel-HOL*, qui permettent la génération de code. Ainsi, à partir de la spécification, il est possible de générer des outils *corrects par construction*. le compilateur *C CompCert*, prouvé correct par Coq, peut par exemple être couplé à un générateur de code C certifié pour former une chaîne de compilation sûre du code source, au code-objet, en passant par le bytecode.

Pour résumer, nous allons utiliser OCaml et la programmation synchrone pour permettre une programmation sûre sur microcontrôleur. La sûreté du programme sera garantie statiquement par la couplage des deux outils. Nous allons implémenter une VM à basse ressource et une extension synchrone d'OCaml, et développer une analyse automatique de WCET pour les programmes utilisant cette plateforme. La vérification formelle de cet outillage dépasse le cadre de cette thèse, mais des propriétés importantes, notamment sur notre extension synchrone, sont prouvés avec Coq.

OMicroB

Où l'on développe une machine virtuelle générique et configurable pour l'exécution du byte-code OCaml sur plusieurs familles de microcontrôleurs à faibles ressources, et l'on déploie des efforts d'optimisation de taille de code et d'usage mémoire

Le langage OCaml

On passe très rapidement sur cette partie.

OCaml est un langage supportant la programmation fonctionnelle et modulaire, ainsi que objet et impérative. Les constructions du langage sont:

- Les valeurs fonctionnelles (fermetures)
- Les tuples & les projections
- Les (G)ADT & le filtrage par motif
- Les enregistrements & les variantes polymorphes
- Les références et la mutabilité
- Les objets & les classes
- Les exceptions
- Les modules & *foncteurs* (c.à.d. fonctions entre modules)

Ocaml supporte un typage statique avancé, muni de

- polymorphisme structurel
- inférence de type
- type principal (c.à.d. le plus général possible)

Et un *runtime* avec gestion automatique de la mémoire par ramasse miette.

La machine virtuelle ZAM

La machine virtuelle ZAM (ou juste "la ZAM") est développée depuis 1996 à l'INRIA, et sert d'environnement d'exécution standard à OCaml. C'est une implémentation de la *machine de Krivine*, à appel par valeur (c.à.d. une sémantique stricte du λ -calcul). Les programmes OCaml, compilés en bytecode, sont soit exécutés sur la ZAM soient compilés d'avantage vers du code objet natif pour une variété de plateformes.

Le bytecode ZAM se compose de 148 instructions (pour OCaml 4.06), pas toutes orthogonale (p.ex., `PUSHACC1 = PUSH; ACC1`). On peut consulter à loisir le projet *Cadmium* pour l'intégralité de la sémantique. Un fichier de bytecode ZAM contient six sections:

- CODE pour les instructions bytecode elles-même
- DATA pour les constantes
- PRIM qui liste les primitives utilisées est leurs "nom" dans le programme
- DLLS, la liste des bibliothèques externes à lier dynamiquement avec le programme

- DLPT, la liste des bibliothèques OCaml utilisés
- DEBUG (optionnelle) pour les informations de débogage.

Les fichiers bytecode contiennent en plus du code propre du programme compilé, un prélude initialisant l'environnement du programme, et le code du module **Pervasives**, qui est chargé avec chaque programme OCaml.

La ZAM est une machine virtuelle à pile, munis des registres classiques **sp**, **pc**, **global_data** et **acc**, mais aussi **trapSp** pointant vers le récupérateur d'exception courant, **extra_args** qui dénote le nombre d'argument saturant l'appel curryfié courant, et **env** qui pointe vers la fermeture courante.

Les données manipulées par la ZAM ont une représentation uniforme, afin de supporter le polymorphisme d'OCaml. Comme tout ce ressemble au runtime, pas besoin de prendre des pincette avec les arguments de type quantifiés. Chaque valeur prend un mot en mémoire (32 ou 64 bits), et le bit de poids faible indique si cette valeur est immédiate, ou un pointeur sur le tas. Comme les pointeurs doivent être alignés sur un mot dans les plateformes usuels, ce bit est déjà nul sur tout les pointeurs valides. Les valeurs allouées sur le tas (on dit *enboité* en bon OCaml), possèdent un en-tête stockant des méta-données de taille, de couleurs pour le GC, et un tag distinguant les types dynamiques (les fermetures ont le tag 247 par exemple). Pour des raisons d'efficacité, les pointeurs vers les valeurs *enboités* pointent vers le premier mot *après* l'en-tête, qui est le premier mot utile de la valeur pour le programme.

La ZAM possède une riche bibliothèque d'exécution, implémentée majoritairement en OCaml puis compilée en bytecode, et complémentée avec du C. La mémoire allouée dynamiquement par la ZAM est libérée par une ramasse-miette hybride. Les valeurs sont allouées dans un tas mineur qui est nettoyé par un algorithme *Stop-and-Copy*. Les valeurs survivantes sont copiés dans le tas majeur, qui est traité par un *Mark-and-Sweep* incrémental, servant aussi à défragmenter le tas.

Compilation et exécution avec OMicroB

OMicroB implémente une machine virtuelle pour le bytecode ZAM en C, profitant ainsi de ubiquité des compilateurs C sur les plateformes de microcontrôleurs. La chaînes de compilation est la suivante: Le code OCaml est compilé en bytecode par le compilateur **ocamlc** standard, puis nettoyé par **ocamlclean**. Il est ensuite empaqueté dans un tableau C statique, puis envoyé avec le code source de la VM au compilateur C du microcontrôleur cible.

Le nettoyage du bytecode OCaml est une étape nécessaire pour garantir une taille minimale de l'exécutable final. En effet, **ocamlc** inclut dans le bytecode toutes les valeurs et fermetures définies dans chaque module compilé, afin de respecter les interfaces que ces modules déclarent, et donc de permettre le chargement dynamique de module. Ainsi, le programme OCaml vide **let _ = ()** produit 2279 instructions ! L'outil **ocamlclean**, développé pour le projet OCaPIC,

permet de supprimer ce code mort du bytecode des programmes compilés pour microcontrôleurs, où l'on ne fait pas usage du chargement dynamique. Le programme vide passe alors à 81 instructions.

Le bytecode nettoyé est ensuite envoyé à `bc2c`, qui produit un fichier C valide stockant les différentes sections du fichier bytecode dans des structures C valides, surtout des tableaux d'énumérations. Il définit aussi la pile et le tas comme des tableaux de taille fixe. La représentation des instructions est plus compacte que sur la machine ZAM, qui aligne ses instructions sur 32 bits. `bc2c` utilise une représentation à longueur variable, avec un octet par entrée dans le tableau d'instruction. Le code résultant est en moyenne 3.5x plus petit. Les compilateurs en aval pouvant représenter ce type de *mémoire programme* dans le stockage flash, `bc2c` utilise cette fonctionnalité dès que possible.

L'interprète d'OmicroB reprend la sémantique de celui de la ZAM, avec les mêmes registres. Une différence majeure est que le registre `pc` pointe désormais sur la mémoire flash. Aussi, le branchement dynamique basé sur le hashage, qui utilise 31 bits de hash dans la version standard, est remplacé par un hashage sur 15 bits, afin de tenir sur 2 octets dans la RAM. Cela permet le support complet des objets et des variantes polymorphes.

Représentation des valeurs

On peut paramétrer OmicroB pour imposer une représentation uniforme des données sur 16, 32, ou 64 bits. Contrairement à la ZAM, les flottants ne sont pas alloués sur le tas. Pour supporter la primitive `compare` : `'a -> 'a -> bool`, il est nécessaire d'adapter la représentation des flottants pour la rendre compatible avec la relation d'ordre sur les entiers machines. Les flottants négatifs sont donc représentés en complément à deux. Une opération XOR booléenne doit être effectuée pour permettre les opérations arithmétiques standard sur les flottants.

Contrairement à la machine ZAM où la distinction valeur immédiate/valeur enboité est faite sur le bit de poids faible, les flottants immédiats en complément à deux impose de choisir une autre distinction. Autrement, le GC ne pourra pas inspecter les valeurs et suivre les pointeurs alloués par le bytecode non-typé. Du fait du faible espace mémoire des microcontrôleurs, on peut profiter du *NaN-boxing* pour encoder les pointeurs jusqu'à 2Mo dans la mantisse des flottants NaN en configuration 32 bits, et »1Go dans la configuration 64bits. Les valeurs NaN des flottants sont comprimées dans un unique flottant NaN, où seul le 21ème bit de la mantisse est égal à 1. Dans la configuration à 16 bits, on impose que le dernier bit de la mantisse soit nul (passage de 10 à 9 bits de précision).

Runtime et bibliothèque standard

On garde la plupart des modules de la bibliothèque standard OCaml tels quels, ceux n'ayant aucun sens (`Unix`) ont été retirés, et d'autres (`Avr`, `LiquidCrystal`) ont été créés spécialement pour l'usage avec les microcontrôleurs. Les GADT

permettent d'encoder quels bits de quels registres spéciaux peuvent être configurés à quel usage:

```
type 'a register =  
  | SPCR : sPCR_bit register  
  | SPSR : sPSR_bit register  
  ...  
val set_bit : 'a register -> 'a -> unit
```

On peut ainsi éviter des erreurs subtiles, que la programmation par macro de C ne permet pas de détecter.

Le ramasse-miette implémente un algorithme *Stop-and-Copy*, simple mais rapide. Il existe un tas *vivant* et un tas de *copie*. Lors du ramassage, les valeurs sont copiées du premier vers le second. Quand le ramassage est terminé, on inverse les tas. Cet algorithme rapide souffre d'un doublage de la taille du tas, mais offre un gain de temps d'exécution. Nous avons aussi implémenté un ramasse-miette *Mark-and-Sweep*, plus lent mais fonctionnant sur un seul tas.

La dernière étape de la compilation est la génération de code natif depuis le C. Utiliser C comme assembleur portable permet de compiler pour plusieurs familles de microcontrôleurs, et de compiler avec un gcc natif pour débogage sur la machine de l'utilisateur. De plus, le portage de la VM d'OmicroB ne nécessite que des modifications *a minima*, pour prendre en compte les différences entre les différentes plateformes.

Enfin, OmicroB, à l'image de son ancêtre OCaPIC, dispose d'un simulateur de circuit, permettant de décrire le microcontrôleur et son environnement électrique, et de simuler, par exemple, des boutons et des écrans OLED.

Optimisations

La réduction de la taille des opcodes de la ZAM de 32 à 8 bits n'est qu'une des optimisations que nous avons apportées à notre VM pour l'adapter aux environnements à faible mémoire que sont les microcontrôleurs.

Premièrement, nous avons implémenté une forme d'évaluation partielle des programmes bytecode OCaml. Notre composant `bc2c` peut en effet exécuter la phase d'initialisation du programme lors de la compilation, avant de sérialiser le tas et la pile tels qu'ils seront avant la première entrée/sortie dans le fichier C.

Aussi, les 148 instructions de la ZAM (encore plus si l'on compte nos spécialisations à différentes tailles d'arguments) ne sont pas toutes nécessaires à l'exécution d'un programme particulier. Il n'est donc pas nécessaire d'inclure de code C les implémentant. L'outil `bc2c` se dispense donc d'inclure le code C des opcodes non présents dans le programme à compiler. Les techniques plus avancées, d'inlining notamment, permettraient de gagner encore plus de temps, mais nous avons jugé qu'elles ont des coûts prohibitifs dans le cadre des microcontrôleurs.