

PSTL: Interface Web Autobill

Pré-Rapport

Fazazi Zeid

Luo Yukai

Dibassi Brahima

2023-04-12

Encadrants: Hector Suzanne, Emmanuel Chailloux

Table des matières

1	Contexte du projet	3
1.1	Historique et définitions	3
1.2	Qu'est-ce qu'Autobill ?	3
1.3	Objectifs du projet	4
1.4	Processus de conception	5
2	Interface web	6
2.1	Client uniquement	6
2.1.1	Outils et technologies utilisés	6
2.1.2	Aperçu de l'interface graphique	8
2.2	Serveur + client	9
2.2.1	Schéma de communication	9
2.2.2	Outils et technologies utilisés	10
2.3	Tâches réalisées	11
3	MiniML	12
3.1	Pourquoi MiniML ?	12
3.1.1	Call-By-Push-Value	12
3.1.2	Contenu actuel	12
3.1.3	Dépendances	12
3.2	Un exemple de code MiniML	13
3.2.1	Schema de traduction	13
4	Conclusion et tâches à réaliser	14
4.1	Conclusion	14
4.2	MiniML	14
4.3	Serveur	14
4.4	Client	14
4.5	Tests	14
	Bibliographie	15

1 Contexte du projet

1.1 Historique et définitions

Dans le cadre de sa thèse sur l’analyse statique de la consommation mémoire d’un programme au sein de l’équipe APR du LIP6, notre tuteur de projet, Hector Suzanne, a développé **Autobill** [1].

L’analyse statique est un domaine de l’informatique qui consiste à mesurer et détecter automatiquement les comportements ou erreurs dans un programme en examinant son code source. Pour effectuer cette analyse sur un langage de programmation donné, il est possible de définir des règles d’évaluation et de typage pour répondre à une problématique. Dans le cas d’Autobill, nous nous sommes particulièrement intéressés par l’occupation de la mémoire d’un programme.

Historiquement, ce sujet de recherche a été plusieurs fois abordé dans divers travaux scientifiques, parmi eux, ceux de Jan Hoffmann sur l’analyse de consommation de ressources automatisé AARA [2]. Des solutions se basant sur ces théories existent, comme Resource Aware ML [3], un langage *à la ML* permettant ce type d’analyse, créé par Jan Hoffman et Stephen Jost.

1.2 Qu’est-ce qu’Autobill ?

La proposition d’Hector Suzanne avec Autobill se différencie par un niveau d’analyse plus précis sur les fermetures et les arguments fonctionnels d’un programme. D’abord, Autobill prend en entrée des programmes écrits soit en modèle machine propre à Autobill, soit en **Call-By-Push-Value** (CBPV) [4], avec ou sans continuation explicite.

C’est un langage qui utilise un paradigme déjà éprouvé, décrit dans la thèse de Paul Blain Lévy [4]. CBPV utilise une pile pour stocker les valeurs et les fonctions manipulées dans le programme. Ainsi, on peut suivre de manière explicite les quantités de mémoire pour chaque valeur introduite/éliminée ou fonction appelée/terminée. Aussi, le langage permet d’exprimer clairement les stratégies d’évaluation utilisées dans le code source: on fixe quand les évaluations se déroulent, afin de mieux prédire la consommation de mémoire à chaque étape du programme. Ces atouts font de CBPV un langage de choix à analyser pour Autobill.

L’entrée est donc imposée. Ainsi, pour étendre l’usage d’Autobill à un autre langage de programmation, un travail de traduction de ce langage donné vers CBPV doit avoir lieu. Cela implique donc de comprendre le langage que l’on compile, notamment les stratégies d’évaluations implicites mises en œuvre, et de l’adapter aux caractéristiques uniques de CBPV citées plus haut.

À partir d’une entrée en LCBPV, Autobill traduit le programme en un code machine avec continuation, exprimant explicitement les contraintes de taille qui s’appliquent sur l’entrée. Il l’internalise, c’est à dire construit l’arbre syntaxique abstrait (AST) de ce programme. Ensuite, Autobill infère dans l’AST le typage de ses expressions ainsi que leurs polarités. Enfin, il en tire en sortie les contraintes dans des formats d’entrées supportés par différents outils de recherche opérationnelles et assistants de preuve, comme MiniZinc [5] ou Coq [6], afin de prouver des propriétés de complexité temporelle ou spatiale.

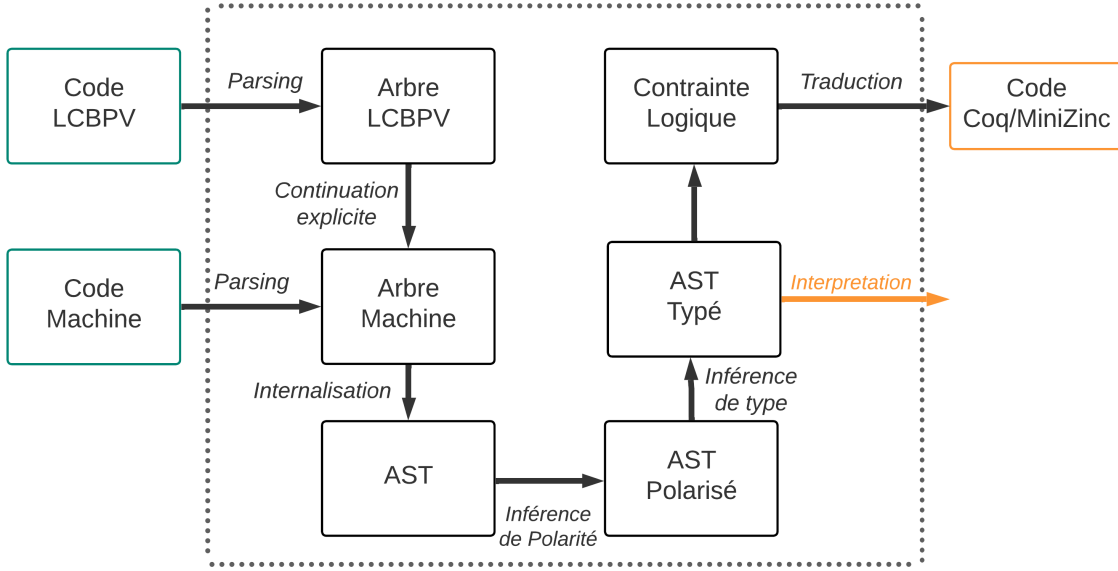


Figure 1: Représentation simplifiée d’Autobill

1.3 Objectifs du projet

Notre démarche se rapproche de celle de RAML [3] avec leur site officiel: offrir une interface Homme-Machine accessible a tous et illustrant un sujet de recherche en analyse statique.

Le sujet de notre projet STL va donc être de soutenir l’effort de développement en proposant une interface sur le Web permettant la libre manipulation de l’outil Autobill par des utilisateurs à travers un environnement de développement sur navigateur.

On souhaite aussi faciliter l’utilisation de l’outil avec un langage fonctionnel pur en entrée plus accessible, un **MiniML**. Cela nous contraint donc à adapter cette nouvelle entrée pour qu’elle soit compatible avec Autobill. Enfin, on se charge aussi de traiter les différentes sorties standards et d’erreurs d’Autobill, notamment les expressions de contraintes, afin de les passer à des solveurs externes, en tirer des preuves de complexité et les afficher directement sur le client Web.

Par rapport à la chaîne d'instructions d'Autobill et à la Figure 1, on se place donc en amont du code LCBPV en entrée et après la sortie en code MiniZinc/Coq.

Notre charge de travail doit se diviser en plusieurs tâches principales:

- L'implémentation du langage MiniML et sa traduction vers LCBPV
- La mise en place d'une interface Web
- La mise en relation entre l'interface Web et la machine Autobill
- Le traitement des contraintes d'Autobill par un solveur externe
- Les tests de performances et comparaisons avec les solutions existantes

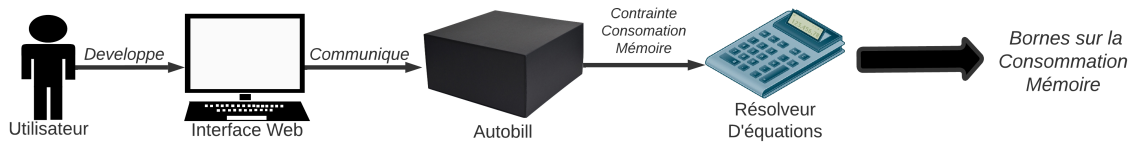


Figure 2: Représentation du système cible

1.4 Processus de conception

Lors de la conception de l'interface, les contraintes étaient multiples. La première était l'interopérabilité des technologies du projet. En effet **Autobill** étant développé en **OCaml**, il était nécessaire de trouver des moyens pour l'adapter à un environnement Web. La seconde était qu'il fallait développer cette interface en simultané avec **Autobill** et ajuster notre travail en fonction des besoins courants de nos encadrants. Mais la plus importante d'entre elles était le souhait de nos encadrants que l'application soit principalement côté client afin de simplifier son déploiement.

Une fois ces contraintes établies, nous avons dû, tout au long de ce projet, effectuer des choix, que ce soit en matière de design ou de technologies. Nous tenons donc à travers ce rapport à mettre en lumière ces décisions, tout en décrivant le travail qu'elles ont engendré.

2 Interface web

Dans l’optique de ne pas se restreindre dans l’utilisation d’outils notamment au niveau du solveur de contraintes, le groupe s’est orienté vers deux structures de projets différentes et indépendantes: l’une fonctionnant avec un client unique, la seconde avec un serveur dédié et un client qui expose ce serveur.

L’avantage réside dans le fait que, lors du développement, si un nouvel outil est amené à être utilisé mais ne dispose de compatibilité sur navigateur Web, alors le serveur peut répondre à ce problème. C’est aussi un sujet de comparaison intéressant à présenter par la suite, que ce soit au niveau des performances que du déploiement de ces solutions.

De cette démarche, il en résulte un code source d’environ 500 lignes, client et serveur compris, faisant tourner notre IDE en ligne dans un état fonctionnel.

2.1 Client uniquement

Une première approche tout client a été mise œuvre dès le début du projet. Celle-ci permettait de garantir une facilité dans le déploiement en ligne de notre solution. L’environnement limité du navigateur Web a remis en question la tenue de cette architecture, mais des compromis ont été trouvés pour satisfaire la contrainte d’interopérabilité entre le Web et Ocaml.

2.1.1 Outils et technologies utilisés

- **HTML / CSS / Javascript (JS)**: Il s’agit de la suite de langages principaux permettant de bâtir l’interface Web souhaitée. On a ainsi la main sur la structure de la page à l’aide des balises HTML, du style souhaité pour l’éditeur de code avec le CSS et on vient apporter l’interactivité et les fonctionnalités en les programmant avec Javascript, complété par la librairie React.
- **React.js** [7]: React.js est une bibliothèque JavaScript *open-source* pour la création d’interfaces utilisateur, utilisée pour la création d’applications web modernes et interactives. Parmi les avantages de cette technologie, il y a l’utilisation du Virtual DOM (Document Object Model) qui permet une mise à jour plus efficace et rapide des éléments d’une page. Le Virtual DOM est une représentation virtuelle d’un arbre DOM qui est stockée en mémoire et mise à jour en temps réel en fonction des interactions de l’utilisateur avec l’interface. On modifie seulement les éléments impactés, et non l’ensemble du DOM de la page, ce qui se traduit par des temps de réponse plus rapides et des meilleures performances.
Aussi, React est basé sur la programmation orientée composant. L’interface utilisateur est décomposée en petits composants réutilisables, chacun étant responsable de l’affichage d’une partie spécifique de l’interface. Chaque composant est construit de manière indépendante et peut être utilisé à plusieurs endroits dans une application. Cette approche modulaire rend l’interface plus flexible et maintenable.

D'autres solutions concurrentes et valables telles que Angular.js [8] ou Vue.js [9] proposent une expérience développeur similaire.

Néanmoins, ces dernières sont bien moins recherchées sur le marché du travail que React. Nous voulions à travers ce projet nous former et pratiquer une technologie très en vogue et que l'on pourra facilement réinvestir plus tard dans notre parcours professionnel.

- **CodeMirror** [10]: C'est une librairie Javascript permettant d'intégrer un éditeur de code puissant, incluant le support de la coloration syntaxique, de l'autocomplétion ou encore le surlignage d'erreurs. Les fonctionnalités de l'éditeur sont grandement extensives et permettant même la compatibilité avec un langage de programmation personnalisé comme MiniML. Enfin, CodeMirror est disponible sous licence MIT, libre de droits.
- **OCaml** [11] [12] [13] + **Js_of_OCaml** [14]: Afin de manipuler la librairie d'Autobill, il est nécessaire de passer par du côté OCaml pour traiter le code en entrée et en sortir des équations à résoudre ou des résultats d'interprétations. Pour faire le pont entre Javascript et OCaml, on utilise Js_of_OCaml, une librairie contenant, entre autres, un compilateur qui transpile du bytecode OCaml en Javascript et propose une grande variété de primitive et de type pour manipuler des éléments Javascript depuis OCaml. L'API de Js_of_OCaml est suffisamment fournie pour développer entièrement des applications web complètes et fonctionnelles.

Pour ce projet, il sert surtout pour interagir avec Autobill et la librairie de MiniML depuis le client Web. Dans un fichier `main.ml`, on exporte un objet Javascript contenant plusieurs méthodes correspondant chacune à un mode d'exécution différent d'Autobill. Chaque méthode prend en entrée le code MiniML à traiter et réalise les transformations nécessaires pour générer la sortie demandée.

Néanmoins, en l'absence de sortie standard ou d'erreurs, les messages d'exceptions d'OCaml, par exemple, n'apparaissent que dans la console Javascript du navigateur. Js_of_ocaml met à notre disposition un module `Sys_js` qui offre des primitives permettant de capturer les possibles messages sur les sorties et les rediriger dans des buffers. Ces buffers peuvent être convertis en chaînes de caractères et retournés au client par la suite.

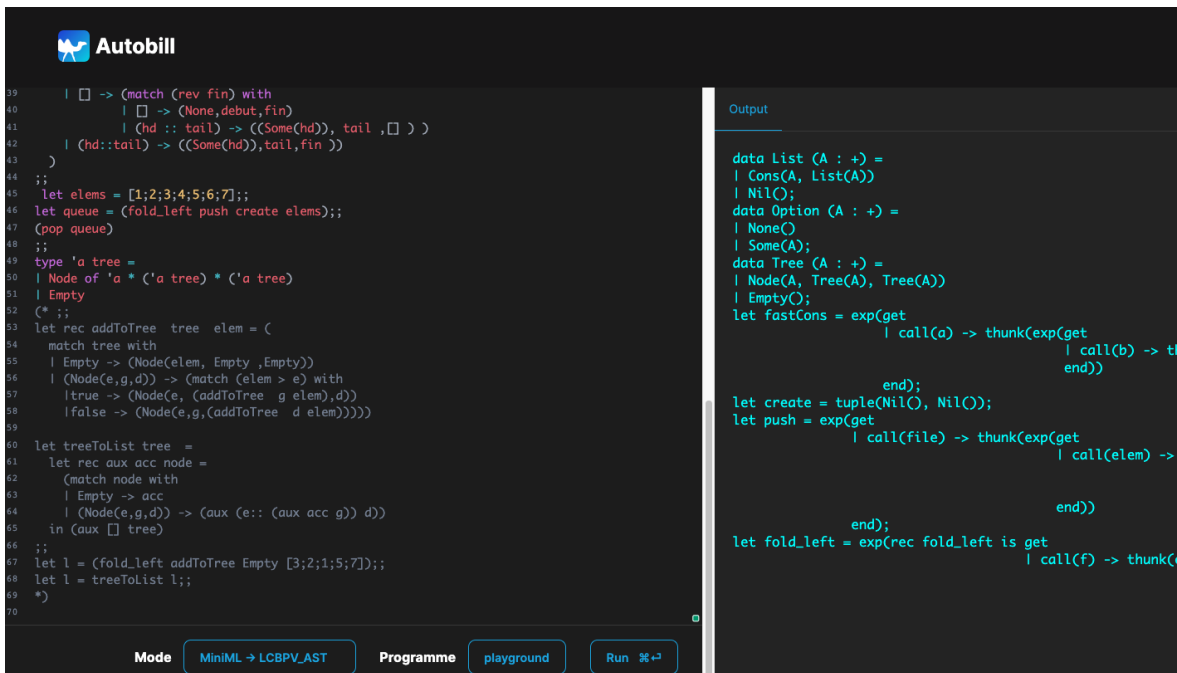
La question s'est posée de l'intérêt de Js_of_OCaml comparé à d'autres technologies comme ReasonML [15] ou Rescript [16]. En effet, ce sont tout deux des langages qui ont émergé d'OCaml et permettent de créer dans un paradigme fonctionnel des applications web complexes. Des compilateurs pour transpiler du code Rescript (Bucklescript) ou ReasonML vers Javascript existent et ReasonML permet même de compiler vers du code en React.

Néanmoins, notre objectif principal est la manipulation de la librairie d'Autobill ainsi que celle de MiniML depuis le Web. Ces deux technologies affichent des syntaxes différentes de celle d'OCaml, ce qui empêche toute compatibilité avec les bibliothèques d'OCaml. Js_of_OCaml en complément avec un client en React correspond donc à un bon compromis dans notre cas d'étude.

- **MiniZinc** [5] : À la génération des expressions de contraintes, Autobill retourne une sortie au format MiniZinc. Ce langage permet de décrire des problèmes de manière déclarative à l'aide de contraintes logiques. L'objectif avec MiniZinc est de calculer les bornes mémoires minimums pour satisfaire les contraintes mémoires du programme et d'afficher, sous forme d'équation, le résultat dans la sortie de notre IDE. Son API prend en charge une large gamme de solveurs. Aussi, il dispose d'une grande communauté d'utilisateurs et de contributeurs, ce qui nous permet de trouver nombreuses ressources disponibles pour l'apprentissage et le dépannage.

Sa librairie est codée en C++ mais il reste utilisable dans notre interface Web grâce à Web Assembly. C'est un format binaire de code exécutable qui permet de porter des applications codées dans des langages de programmation sur le Web. Grâce à des compilateurs vers Web Assembly, comme Emscripten pour C/C++, on peut lancer des tâches intensives de résolution de contraintes, depuis n'importe quel navigateur Web moderne.

2.1.2 Aperçu de l'interface graphique



The screenshot shows the Autobill web interface. On the left is a code editor with a dark theme, displaying MiniML code. The code includes a function definition for a list, a fold operation, and a tree structure. On the right is an 'Output' window showing the generated MiniZinc code, which defines data types like List, Option, and Tree, and includes a fold operation. At the bottom, there are buttons for 'Mode' (set to 'MiniML → LCBPV_AST'), 'Programme', 'playground', and 'Run'.

```

39 | [] -> (match (rev fin) with
40 | [] -> (None,debut,fin)
41 | (hd :: tail) -> ((Some(hd)), tail ,[] ))
42 | (hd::tail) -> ((Some(hd)),tail,fin ))
43 )
44 ;;
45 let elems = [1;2;3;4;5;6;7];;
46 let queue = (fold_left push create elems);;
47 (pop queue)
48 ;;
49 type 'a tree =
50 | Node of 'a * ('a tree) * ('a tree)
51 | Empty
52 (* ;;
53 let rec addToTree tree elem = (
54 match tree with
55 | Empty -> (Node(elem, Empty, Empty))
56 | (Node(e,g,d)) -> (match (elem > e) with
57 | true -> (Node(e, (addToTree g elem),d))
58 | false -> (Node(e,g,(addToTree d elem))))))
59
60 let treeToList tree =
61 let rec aux acc node =
62 (match node with
63 | Empty -> acc
64 | (Node(e,g,d)) -> (aux (e::(aux acc g)) d))
65 in (aux [] tree)
66 ;;
67 let l = (fold_left addToTree Empty [3;2;1;5;7]);;
68 let l = treeToList l;;
69 *)
70

```

```

Output
data List (A : +) =
| Cons(A, List(A))
| Nil();
data Option (A : +) =
| None();
| Some(A);
data Tree (A : +) =
| Node(A, Tree(A), Tree(A))
| Empty();
let fastCons = exp(get
| call(a) -> thunk(exp(get
| call(b) -> t
end))
end);
let create = tuple(Nil(), Nil());
let push = exp(get
| call(file) -> thunk(exp(get
| call(elem) ->
end))
end);
let fold_left = exp(rec fold_left is get
| call(f) -> thunk(

```

Figure 3: Aperçu de l'interface graphique

2.2 Serveur + client

Dans le stade actuel d'Autobill, une architecture avec un client seul peut répondre aux exigences du projet STL. Néanmoins, Autobill évolue constamment et rien ne garantit que ses itérations suivantes puissent être supportées par notre solution. Dans l'optique de rendre notre solution plus flexible et *futureproof*, une nouvelle version de notre interface, qui déporte les tâches complexes vers un serveur distant, a été développée.

On a souhaité aussi adapter le client pour qu'il opère dans ces deux architectures différentes. Ainsi, dans notre environnement de développement, on peut facilement faire la bascule entre un mode de fonctionnement local/synchrone et un mode distant/asynchrone.

2.2.1 Schéma de communication

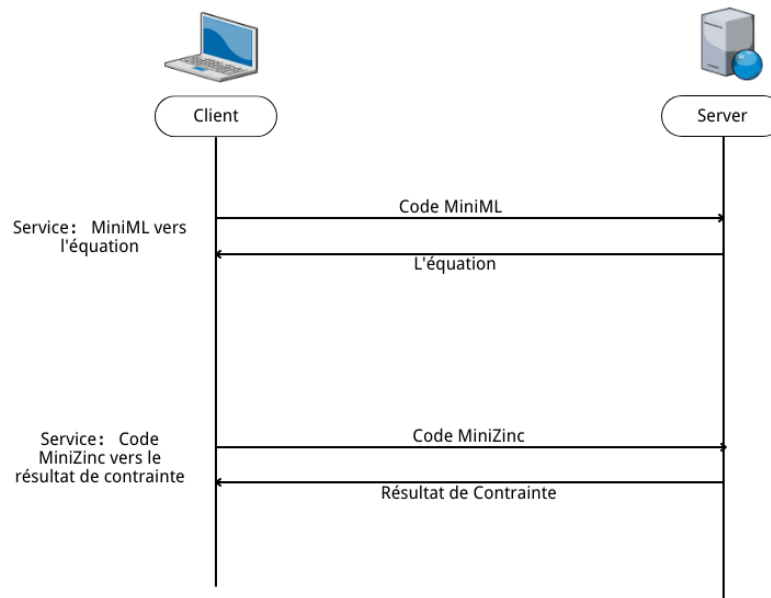


Figure 4: Schéma de communication

2.2.2 Outils et technologies utilisés

- **NodeJS** [17] : NodeJS permet une gestion asynchrone des opérations entrantes, ce qui permet d'exécuter plusieurs opérations simultanément sans bloquer le fil d'exécution principal. Par exemple, si deux requêtes sont envoyées au serveur en même temps, elles seront gérées en parallèle par le serveur. Ainsi, grâce à cette gestion asynchrone, NodeJS permet d'optimiser l'utilisation des ressources système en réduisant les temps d'attente et en évitant les blocages inutiles, ce qui peut augmenter l'efficacité et les performances du programme. En outre, NodeJS est également connu pour son excellent support de la gestion des entrées/sorties et du traitement de données en temps réel.

De plus, la grande quantité de packages disponible sur NPM (le gestionnaire de packages de Node Js) permet de gagner beaucoup de temps de développement et de faciliter notre tâche. Par exemple, le module Child processes [18] nous permet d'exécuter le code MiniZinc en passant les commandes directement. Cela nous permet d'éviter les restrictions du côté tout-client au niveau du résolveur de contraintes notamment. Enfin, un des avantages de NodeJS est qu'il nous permet d'utiliser le même langage de programmation que le client. On s'évite ainsi les écueils autour de l'interopérabilité et de la compatibilité entre deux instances codées dans des langages différents.

- **Express.js** [19] : Express.js est une bibliothèque d'application web populaire basé sur la plateforme Node.js, utilisé pour construire des applications web et des API évolutives. Il fournit de nombreux middlewares, tels que morgan [20] pour enregistrer les journaux de session HTTP et helmet [21] pour garantir la sécurité. Avec Express.js, nous pouvons facilement ajouter des middlewares en utilisant directement `app.use()` sans avoir à les ajouter manuellement. De plus, Express.js dispose d'un puissant routeur qui permet aux développeurs de gérer facilement les routes et de construire des API REST de manière efficace. Par conséquent, l'utilisation d'Express.js rend la développement plus facile et plus efficace, et rend également le code plus concis. Donc il permet aux développeurs de créer facilement des applications web plus rapides et évolutives. Il dispose d'une plus grande communauté que les bibliothèques plus jeunes, avec de nombreuses ressources et solutions disponibles.
- **REST API** [22] : L'API REST est un modèle de conception d'interface de programmation d'application Web (API) utilisé pour fournir un accès aux ressources sur le Web. Il est basé sur le protocole HTTP et utilise des requêtes et des réponses HTTP pour communiquer.

La conception de l'API REST est très simple, elle utilise des verbes HTTP (GET, POST, PUT, DELETE, etc.) pour représenter les opérations effectuées, utilise des formats de données standards (tels que JSON, XML) pour la transmission de données, et utilise des codes d'état HTTP standard pour représenter l'état de la réponse, par exemple, le code 200 représente le succès, le code 404 représente la

ressource introuvable, etc.

Cela permet aux clients de rapidement déterminer le résultat de la réponse en fonction du code d'état, sans avoir besoin de parser des informations de réponse complexes. Par rapport à "SOAP" qui ne peut utiliser que XML pour transférer des informations, l'API REST simplifie et facilite l'échange de données entre les clients et les serveurs.

2.3 Tâches réalisées

- Intégration d'un IDE similaire aux *Playground* de [OCaml](#) et [Rescript](#)
- Implémentation d'un éditeur de code supportant la syntaxe de **MiniML**
- Liaison entre le code Javascript et OCaml à l'aide de `Js_of_OCaml`
- Implémentation de plusieurs modes de traitement du code **MiniML**:
 - Affichage de l'AST MiniML
 - Affichage de l'AST de **Call-By-Push-Value**
 - Affichage de l'équation résultant de l'analyse statique
 - Vers Représentation Interne **Autobill**
- Remontée d'erreurs et affichage dynamique sur l'interface
- Implémentation du solveur d'équations MiniZinc côté client
- Mise en place d'un serveur distant manipulant les libraires OCaml du projet et le solveur MiniZinc
- Exposition du serveur avec une API REST
- Mise en relation du client et du serveur

3 MiniML

3.1 Pourquoi MiniML ?

MiniML émerge du choix par nos encadrants de créer un langage fonctionnel simple et accessible pour les utilisateurs d'Autobill servant d'abstraction à **LCBPV**. Dans le cadre de ce projet MiniML, dispose d'une implémentation écrite en **OCaml**. Nous avons pris la décision de rendre la syntaxe MiniML parfaitement compatible avec OCaml simplifiant les comparaisons avec RAML [3].

Le développement de **MiniML** suivant les besoins de nos encadrants celui-ci est pour l'instant sans effets de bord.

3.1.1 Call-By-Push-Value

Le paradigme de traitement de langage **Call-By-Push-Value** utilisé par **Autobill** permet à l'aide d'une seule sémantique de traiter deux types de stratégies d'évaluation différentes **Call By Value** utilisée par **OCaml** et **Call By Name** utilisée par **Haskell** pour mettre en place l'évaluation *Lazy*. Dans LCBPV, une distinction a lieu entre les calculs et les valeurs permettant de décider en détail comment ceux-ci sont évalués. Nous permettant lors de la traduction depuis un autre langage de choisir le type de stratégie utilisé

3.1.2 Contenu actuel

- Integer
- Boolean
- Listes
- Fonction récursives
- Opérateurs de bases
- Construction de types de données
- Types de données paramétrés
- Types de données récursifs
- Variables globales/locales
- Files (*FIFO*)

3.1.3 Dépendances

- **Menhir** [23]: *Menhir* est l'unique dépendance de l'implémentation de MiniML, librairie permet la génération d'analyseurs syntaxiques en OCaml nous permettant d'éviter le développement d'un analyseur syntaxique rigide. C'est à la suite de différents tests de compatibilité avec les deux architectures du projet que nous avons choisi cette librairie nous permettant un gain en temps et en flexibilité non négligeable. Menhir est disponible sous licence GPL

3.2 Un exemple de code MiniML

Cet exemple est une implémentation possible d'une file d'attente en **MiniML**.

```
type 'a option =
| None
| Some of 'a
;;

let createQueue = ([], []);;

let push file elem =
(match file with
| (a,b) -> (a,(elem::b)))
;;

let pop file =
  (match file with
  | (debut, fin) ->
    (match debut with
    | [] -> (
        match (rev fin) with
        | [] -> (None,debut,fin)
        | (hd :: tail) -> ((Some(hd)), tail ,[])
      )
    | (hd::tail) -> ((Some(hd)),tail,fin ))
  )
;;

let elems = [1;2;3;4;5;6;7];;
let queue = (fold_left push createFile elems);;
(pop queue)
```

3.2.1 Schema de traduction

Dans le prochain rapport, nous allons nous baser sur une variante de cet exemple pour décrire, avec des schémas de traduction basés sur la spécification du langage comment l'on passe d'un code **MiniML** à un code **Call-By-Push-Value** pour reçu en entrée par **Autobill**

4 Conclusion et tâches à réaliser

4.1 Conclusion

La réalisation de cette interface a fait intervenir un large panel de sujets en lien avec la formation du Master d’informatique STL et mis à profit les connaissances acquises lors de ce semestre. Le projet est à un stade d’avancement satisfaisant. Autobill étant encore en phase expérimentale, celui-ci ajoute continuellement des nouveautés et corrections que l’on doit intégrer.

La suite consistera surtout à consolider les bases établies sur tous les aspects du projet présentés dans ce rapport et les adapter aux changements d’Autobill. Aussi, il serait intéressant à titre de démonstration de comparer notre solution avec celle de Jan Hoffmann et l’interface de RAML [3], mentionnée en section 1.

4.2 MiniML

- Ajout de sucre syntaxique. (Records, Operateurs Infixes, ...)
- Ajout d’une librairie standard.
- Spécification complète du langage.
- Bibliothèque de structures de données complexes
- Règles de traduction de **MiniML** vers **Autobill**
- Schémas de traduction d’une structure *FIFO* vers **LCBPV**

4.3 Serveur

- Affichage des erreurs
- Réalisation des autres services pour MiniML
- Réalisation de génération de solution depuis le code Autobill

4.4 Client

- Retouches esthétiques
- Affichage des erreurs sur plusieurs lignes
- Couverture d’erreurs à traiter la plus grande possible, afin d’éviter les blocages du client
- “Benchmark” la résolution d’équations plus complexes avec le MiniZinc client
- Proposer des programmes d’exemples à lancer, demandant des lourdes allocations mémoires.

4.5 Tests

- Comparaison d’architectures Full-Client vs Client-Serveur
- Comparaison **RAML** vs **Autobill**

Bibliographie

- [1] H. Suzanne, « Autobill ». <https://gitlab.lip6.fr/suzanneh/autobill>, 2023.
- [2] J. Hoffmann et S. Jost, « Two decades of automatic amortized resource analysis », *Mathematical Structures in Computer Science*, vol. 32, p. 729-759, mars 2022, doi: [10.1017/s0960129521000487](https://doi.org/10.1017/s0960129521000487).
- [3] J. Hoffmann, « Resource Aware ML ». <https://www.raml.co/>.
- [4] P. B. Levy, « Call-By-Push-Value: A Subsuming Paradigm », in *Call-By-Push-Value*, Springer Netherlands, 2003, p. 27-47. doi: [10.1007/978-94-007-0954-6_2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0954-6_2).
- [5] « Minizinc », *MiniZinc*. 2023. Disponible sur: <https://www.minizinc.org/>
- [6] INRIA, « The coq proof assistant », *The Coq Proof Assistant*. 2023. Disponible sur: <https://coq.inria.fr/>
- [7] Facebook, « React – Une bibliothèque JavaScript pour créer des interfaces utilisateurs ». 2023. Disponible sur: <https://fr.reactjs.org/>
- [8] « AngularJS », *AngularJS*. 2023. Disponible sur: <https://angular.io/>
- [9] « VueJS », *VueJs*. 2023. Disponible sur: <https://vuejs.org/>
- [10] M. Haverbeke, « Codemirror », *CodeMirror*. 2023. Disponible sur: <https://codemirror.net/>
- [11] Y. Minsky, A. Madhavapeddy, et J. Hickey, *Real World OCaml*. <https://dev.realworldocaml.org/>; O'Reilly Media, 2013.
- [12] E. Chailloux, P. Manoury, et B. Pagano, « Développement d'applications avec Objective Caml ». <https://www-apr.lip6.fr/~chaillou/Public/DA-OCAML/>; O'Reilly Media, 2000.
- [13] X. Leroy, « OCaml Library ». <https://ocaml.org/api/>.
- [14] Ocsigen, *Js_of_ocaml*. Ocsigen, 2023. Disponible sur: https://ocsigen.org/js_of_ocaml/latest/manual/overview
- [15] « ReasonML », *ReasonML*. 2023. Disponible sur: <https://reasonml.github.io/>
- [16] « Rescript », *Rescript*. 2023. Disponible sur: <https://rescript-lang.org/>
- [17] O. Foundation, « Node.js », *Node.js*. 2023. Disponible sur: <https://nodejs.org/en>
- [18] O. Foundation, « Child processes », *Child processes*. 2023. Disponible sur: https://nodejs.org/api/child_process.html

- [19] O. Foundation, « Express.js », *Express.js*. 2023. Disponible sur: <https://expressjs.com/fr/>
- [20] O. Foundation, « morgan », *morgan*. 2023. Disponible sur: <https://www.npmjs.com/package/morgan>
- [21] A. Baldwin, « helmet », *helmet*. 2023. Disponible sur: <https://helmetjs.github.io/>
- [22] E. Chailloux, « Cours PC3R ». 2018. Disponible sur: <https://www-apr.lip6.fr/~chaillou/Public/enseignement/2018-2019/pc2r/public/cours/Cours08.pdf>
- [23] INRIA, « Menhir Parser », *Menhir Reference Manual*. 2023. Disponible sur: <http://gallium.inria.fr/~fpottier/menhir/manual.html>