

#### **AUGUSTO GANDINI\***

#### Il progetto dei reattori nucleari: evoluzione dei codici e dei mezzi di calcolo

Abstract – Viene presentata l'evoluzione dei codici utilizzati negli studi e nel progetto neutronico dei reattori nucleari, con riferimento alla parallela evoluzione degli strumenti di calcolo. Vengono quindi illustrate le prospettive di sviluppo in questo settore nell'ambito di una rete di calcolo europea.

#### 1. Evoluzione dei mezzi di calcolo

Due sono le date che segnano gli inizi dello sviluppo dell'energia nucleare:

- Il 2 dicembre 1942, data della salita a criticità del primo reattore nucleare, la Chicago Pile 1, che Enrico Fermi ed i suoi collaboratori realizzarono presso l'Università di Chicago. Lo strumento principale di cui Fermi disponeva allora per eseguire i suoi calcoli di previsione sul comportamento del sistema era il regolo calcolatore.
- Il 1955, anno in cui venne organizzata sotto gli auspici delle Nazioni Unite la prima conferenza di Ginevra sugli usi pacifici dell'energia nucleare. In tale conferenza vennero messi a conoscenza della comunità scientifica internazionale informazioni cruciali da parte di americani (e di russi) su dati e metodi per il progetto dei reattori. Da quella data le attività di ricerca nelle varie discipline implicate nello sviluppo dell'energia nucleare, ed in particolare le tecniche di simulazione del comportamento dei reattori, si moltiplicarono in modo impressionante, grazie sopratutto al parallelo sviluppo degli elaboratori numerici.

Come illustrato nella tabella 1 [1], da allora si stabilì una sinergia virtuosa, nel senso che:

<sup>\*</sup> Dipartimento di Energia Nucleare, Università di Roma «La Sapienza», Corso Vittorio Emanuele II 244, 00186 Roma.

- da un lato la disponibilità di calcolatori sempre più veloci e con maggiore capacità di memoria consentivano via via calcoli di simulazione più rapidi ed efficaci,
- dall'altro lato la domanda di maggiori prestazioni stimolava la ricerca di elaboratori elettronici più potenti. Ricordiamo che la neutronica era a quell'epoca tra le scienze più 'demanding' in termini di capacità di calcolo.

Tab. 1 – Computer performance for neutronic calculations.

Generation	Year	Computer	Maximum number	of dimensions for
			Parametric studies	Single calculations
1	1954-1960	Univac I and II IBM 650	1 (e.g., multigr. calculat. zero-dimension)	2 (Diffusion calculat. multigroup 1-D)
1-2	1960-1965	IBM 705	2 (Diffusion calculat., 1-D multigroup	3 (Burnup calculat. Diffusion calculat. 2-D multigroup)
2-3	1965-1968	CDC 6600 IBM 350/31 IBM 360/85	3 (Burnup calculat., diffusion calculat. 2-D multigroup	4 (Diffusion calculat. 3-D multigroup
3		Prossima gener. di calcolatori	4	5

La sinergia tra sviluppo di calcolatori e di metodi e procedure di calcolo è perdurata nel tempo, nella tabella successiva 2 [2] sono illustrate le tappe dell'evoluzione dei codici neutronici dal 1970.

Tab. 2

	Diffusion theory code (multigroup)	Transport theory code	Monte Carlo code
1970	2-D		
1980	3-D	1-D	Marginal
1990	3-D	2-D	Marginal
2000	3-D	3-D, homog. subassemblies	Frequent
2010	3-D	3-D, cell-by-cell	Systematic

#### Il metodo Monte Carlo

Il metodo Monte Carlo nelle ultime decadi ha raggiunto la condizione di metodo numerico di riferimento per risolvere i problemi di simulazione complessi.

Fermi negli anni 30 usò il metodo Monte Carlo per i calcoli di diffusione neutronica. Negli anni 40 von Neumann sviluppò i fondamenti formali del metodo introducendo i concetti di funzione di densità di probabilità, e quello di generazione di numeri pseudorandom. Il lavoro venne fatto in collaborazione con Ulam, Metropolis [3] e Richtmeyer. Questi si resero presto conto dell'importanza dell'elaboratore digitale per l'applicazione del metodo.

Il ben noto codice MCNP [5], iniziato in quegli anni a Los Alamos, è il prodotto del loro lavoro e rappresenta oggi oltre 400 uomini-anno di sviluppo.

Il metodo Monte Carlo oggi viene utilizzato in vari settori della scienza e della tecnologia per la risoluzione di problemi di grande complessità non affrontabili altrimenti con metodi deterministici.

Con l'avvento dei supercomputers e della programmazione parallela, nel campo della reattoristica con i codici Monte Carlo sono possibili oggi simulazioni di grandi sistemi costituiti da migliaia di superfici e con l'emissione di miliardi di particelle.

Recentemente sono stati resi disponibili modelli quantitativi atti a stabilire il grado di parallelismo ottimale. Con la disponibilità di nuovi generatori di numeri pseudo-random, cui sono legati i limiti di prestazione del metodo, si possono implementare parellelizzazioni di grado elevato e di grana fine.

#### 2. Lo sviluppo degli strumenti di calcolo

Per illustrare a grandi linee lo sviluppo raggiunto dalle metodologie di calcolo oggi utilizzate per il progetto dei reattori nucleari, sono nel seguito illustrate le attività svolte nei centri del CEA in Francia, un paese in cui l'energia nucleare da fissione è ormai matura ed in cui gli studi in questo campo sono all'avanguardia. Sono quindi illustrate le attività in corso in Giappone per la creazione di una rete per la condivisione delle risorse di calcolo tra vari laboratori di ricerca, tra cui il centro nucleare JAERI.

#### 2.1. Attività in Francia

In Francia sono previste entro i prossimi vent'anni importanti decisioni riguardanti i nuovi mezzi di produzione di energia elettrica. Si ritiene quindi fondamentale la preparazione di strumenti adeguati alle future esigenze dell'industria nucleare ed il mantenimento delle competenze necessarie. Ciò implica in particolare di rendere coerenti

- le conoscenze di base,
- gli strumenti sperimentali
- la simulazione numerica.

È in corso un processo di riorganizzazione delle unità operative su questa linea. Dal 2001 sono state infatti iniziate le attività necessarie all'implementazione, in collaborazione con EdF, delle piattaforme [4]:

- «Descartes», dedicata ai codici per gli studi di neutronica (v. Appendice 1)
- «Neptune», dedicata ai codici per gli studi di termoidraulica
- «Pléiades», dedicata ai codici per gli studi sui combustibili
- «Reve», dedicata ai codici per gli studi sui materiali irraggiati
- e, in collaborazione con ANDRA, della piattaforma
- «Alliances», per gli studi sul confinamento geologico dei rifiuti radioattivi (v. Appendice 2).

Le piattaforme Descartes, Neptune e Pléiades verranno integrate a loro volta nella piattaforma informatica Salomé (v. schema in figura 1).

Da rilevare che esiste in prospettiva, entro il prossimo decennio, un terzo livello di integrazione, denominato NURESIM (NUclear REactor SIMulation), un progetto proposto da un Consorzio europeo, di cui anche l'Italia fa parte). Esso è costituito da una piattaforma composta da due parti:

 una parte denominata Open Source Software (inizialmente sviluppata nel quadro del programma nazionale francese SALOME);

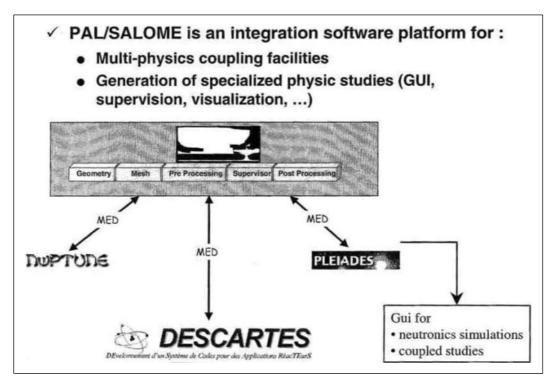


Fig. 1.

 una parte applicativa che rappresenta lo scopo del progetto NURESIM (con diritti di accesso ristretto regolati dal Consorzio stesso)

L'uso della piattaforma prevede quattro modalità di operazione:

- Compatibilità degli inputs e outputs dei moduli di utilizzo con il «Nuresim Data Model». I vantaggi maggiori riguardano il benchmarking;
- 2. «Chaining»: debole accoppiamento fra i moduli (utilizzo solo di dati persistenti, non previste controreazioni, nè iterazioni);
- 3. «Integration»: forte accoppiamento dei moduli (con supervisione del sistema Salomé). Diritti di accesso regolati da Salomé.
- 4. Uso/validazione/sviluppo dei nuovi moduli integrati nella piattaforma. Ulteriori informazioni su Nuresim sono riportate nell'Appendice 3.

#### Portabilità

Attualmente i codici del CEA possono essere usati su ogni tipo di calcolatori, dai supercomputer HP/Compaq, Fujitsu o CRAY fino ai PC (con sistemi Linux o Solaris) o le workstations di ogni tipo (SUN, IBM, HP/Compaq, Silicon Graphics, DEC, ecc.).

Lo sviluppo dei codici è effettuato secondo rigorose regole di garanzia della qualità.

Nell'Appendice 4 sono elencati i maggiori supercomputers attualmente disponibili in Francia, tra i quali sono evidenziali quelli installati presso il CEA, ed alcune informazioni sul loro utilizzo.

#### I codici di calcolo

#### Metodi deterministici

Il sistema di codici SAPHYR è la catena informatica integrata per il calcolo neutronico dei reattori. Essa utilizza metodi di risoluzione deterministica e rappresenta un'attività di ricerca e sviluppo durato vari decenni.

Il sistema SAPHYR consente di tener conto adeguatamente delle controreazioni termiche attraverso l'accoppiamento dei codici di termoidraulica (FLICA) con quelli di diffusione neutronica (CRONOS). La distribuzione di potenza nel nocciolo e la sua evoluzione temporale possono quindi essere valutate entro le precisioni richieste sia per analisi di progetto che per studi di sicurezza.

Per quanto riguarda l'architettura del software, questa è caratterizzata da:

- assenza di limiti per quanto riguarda il numero di gruppi energetici in cui è suddiviso lo spettro neutronico, l'ordine di anisotropia angolare dello scattering, le dimensioni delle catene isotopiche;
- strutturazione ad oggetti;
- strutturazione a moduli.

Nelle figure 2 e 3 sono rappresentate le connessioni tra i suoi componenti principali, mentre la qualificazione dei codici in base ai dati sperimentali è illustrata nella figura 4 e la validazione delle librerie di dati nella figura 5 [2].

#### SAPHYR: Main Components

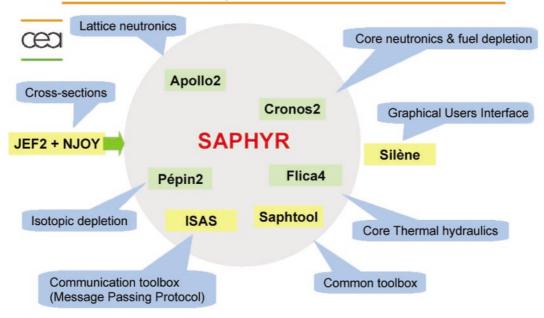


Fig. 2.

### SAPHYR: 2 step PWR Core Calculation

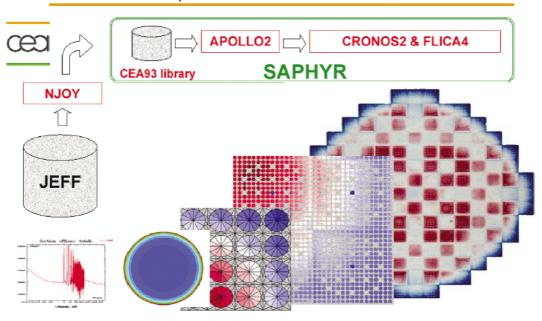


Fig. 3.

#### The validation process

#### > Schematic flow diagram

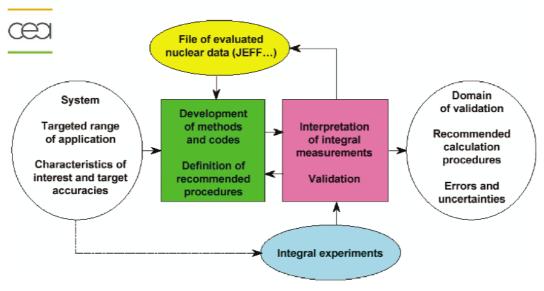


Fig. 4 (Ref. 2).

#### Flow diagram of the nuclear data production and validation process

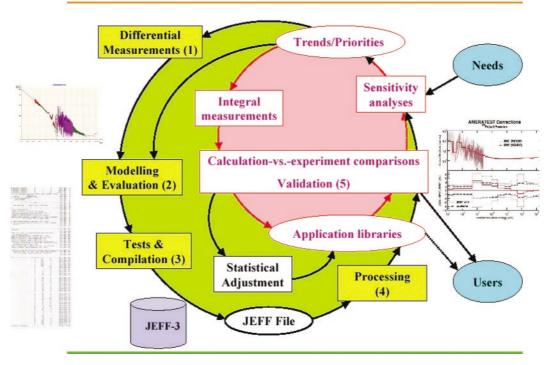


Fig. 5 (Ref. 2).

#### Metodi probabilistici

I codici utilizzati in Francia per l'analisi probabilistica della diffusione neutronica sono MCNP [5] e TRIPOLI [6], il primo sviluppato a partire dagli anni '50 a Los Alamos, il secondo a partire dagli anni '80 presso il CEA.

Inizialmente il metodo Monte Carlo veniva utilizzato per determinare la propagazione dei neutroni negli schemi protettivi del reattore, generalmente caratterizzati da geometrie molto complesse, difficilmente trattabili con accuratezza dai metodi deterministici. In questi casi veniva assegnata una determinata sorgente di neutroni e questi venivano seguiti nel loro percorso fino alla loro scomparsa (per cattura o fuga dal sistema). Oggi questo metodo si sta affermando sempre più anche per analisi di criticità di sistemi moltiplicanti, per la possibilità che offre di rappresentare in dettaglio sia la geometria del nocciolo che le strutture energetiche delle sezioni d'urto (di cattura e scattering) che caratterizzano le interazioni dei neutroni con il mezzo circostante.

Il codice TRIPOLI è utilizzato come riferimento in CRISTAL [7], un sistema di codici progettato per valutare con precisione i rischi associati ai combustibili spenti (analisi di criticità, dosimetria neutronica e gamma). Esso risponde alle esigenze dell'industria e delle autorità di sicurezza in relazione agli impianti per il ciclo del combustibile nucleare e il trasporto dei materiali fissili. L'architettura funzionale del sistema CRISTAL è illustrata nello schema di figura 6.

Il codice TRIPOLI fa anche parte di MERCURAD [8], un software di calcolo sviluppato dal CEA assieme alla Società COGEMA (combustibili nucleari). MERCURAD è caratterizzato da una interfaccia con l'utente estremamente evoluta per calcoli di dosimetria complessi (v. figura 7).

#### 2.2. Attività in Giappone

In Giappone in questi anni si è avuto un progresso enorme nello sviluppo di strumenti informatici, culminato con l'acquisizione del Earth-Simulator supercomputer (36 Tflops). Attualmente stanno portando avanti un progetto denominato ITBL (Information Technology Based Laboratory) per la condivisione in rete delle risorse di calcolo esistenti in sei laboratori nazionali [9], cioè

#### RIKEN

- Infrastructure: Secure network infrastructure (VPN)
- Application: full cell simulator
- Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)
  - Hardware: managing the ITBL supercomputer
  - Infrastructure: Tool kit for grid computing
  - Application: Regional Environment simulator
- National Institute of Materials Science (NIMS)
- Japan Science and Technology Corporation (JST)
  - Application: Materials design simulator

#### DATA PROCESSING

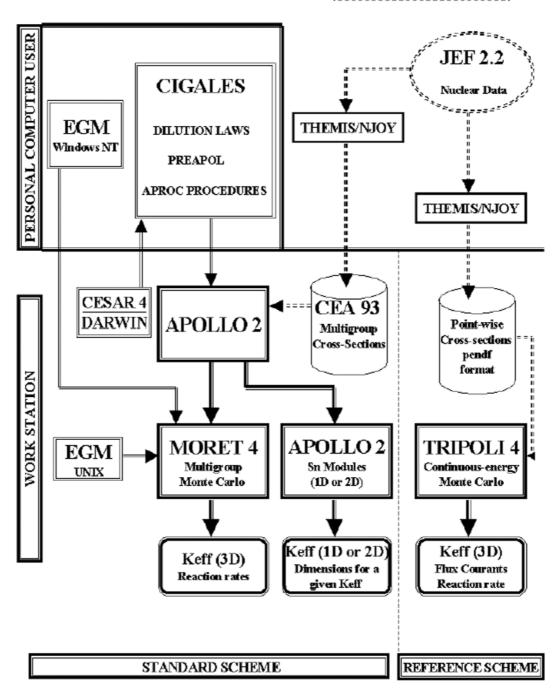


Fig. 6 (Ref. 7).

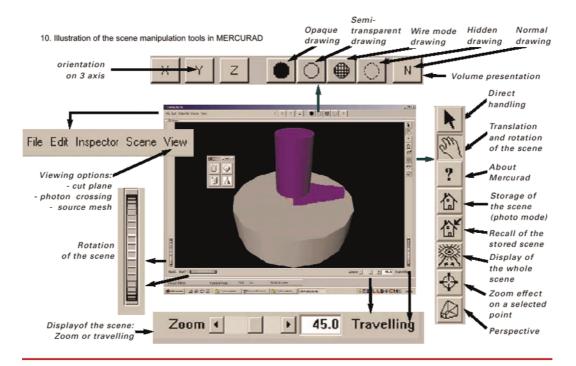


Fig. 7 (Ref. 8).

- National Aerospace Laboratory of Japan (NAL)
  - Application: Integrated aerospace simulator
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)
  - Application: Actual size vibration simulator

Lo stato del progetto al 2002 è illustrato nella figura 8, mentre nella figura 9 sono indicati gli steps per gli anni successivi. La figura 10 illustra l'architettura del sistema.

È previsto l'allargamento della rete ad istituti di ricerca stranieri.

Per quanto riguarda gli studi ambientali, essi riguardano vari aspetti, come sotto indicato.

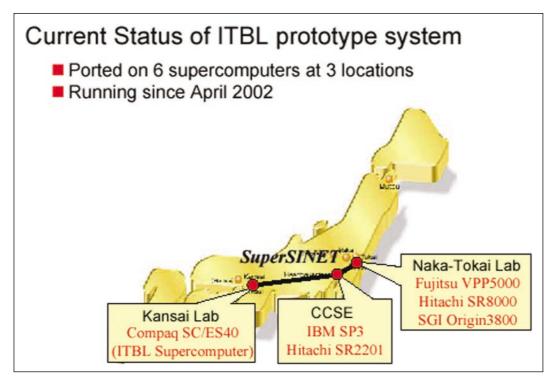


Fig. 8.

# Next Steps of the ITBL Project

#### 1st Step

 Supercomputers in the six different research organizations will be linked by the end of FY2003 (At present, 3 organizations are being linked.)

#### 2nd Step

 Major supercomputers belonging to research organizations and universities affiliated with the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) will be networked by the end of FY2005.

# Software Architecture of ITBL System

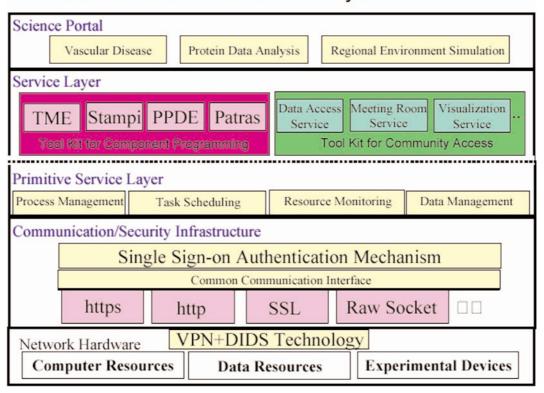


Fig. 10.

# ITBL Applications Numerical Environmental System

Integrated simulation system with Environmental model for Atmosphere, Ocean, Continents and Weather and Geographical data to forecast and analyze phenomena related to environment.

- (1) Diffusion of pollutant (NOx, Sox, Acid rain)
- (2) Emergency (Nuclear Accident)
- (3) Diffusion forecast (Eruption)

JAERI, l'ente di ricerca nucleare di Tokai-mura, sull'Earth Simulator Supercomputer prevede inoltre calcoli a grande scala per studi relativi a:

- comportamento di fluidi multifase, anche in regime di turbolenza, per l'analisi termoidraulica dei reattori nucleari,
- dinamica molecolare,
- meccanismi di spallazione in target di mercurio (adottato nel progetto di un acceleratore di protoni di elevata intensità).

#### 3. Conclusioni

È prevedibile che nei prossimi anni ci sarà un'attenzione crescente all'energia nucleare, dati:

- l'ottimo record di efficienza e sicurezza delle centrali nucleari provate in funzione oggi nel mondo, in particolare nei paesi della Comunità Europea,
- la necessità di ridurre l'inquinamento atmosferico ed il riscaldamento dell'ambiente dovuto all'effetto serra,
- la necessità di ridurre significativamente la dipendenza dai combustibili fossili provenienti da paesi in zone «calde», in considerazione anche della possibilità di produrre idrogeno come combustibile per trazione utilizzando il calore di processo prodotto dai reattori ad alta temperatura.

Nei prossimi anni vedranno la luce i sistemi innovativi cosiddetti della IV generazione. Oltre ad affrontare ancor più incisivamente i problemi legati alla sicurezza ed all'efficienza degli impianti, questi reattori potranno risolvere in modo radicale i problemi di lungo periodo dei rifiuti radioattivi. In essi gli isotopi pesanti componenti il materiale combustibile (generalmente emettitori di radiazione alfa e dalla vita media dell'ordine delle centinaia di migliaia di anni) verrebbero infatti distrutti attraverso il processo di trasmutazione/fissione, producendo peraltro energia. Resterebbero alla fine da confinare geologicamente i soli prodotti di fissione, nuclidi «leggeri» dalla vita media dell'ordine non oltre le centinaia di anni.

Questa nuova generazione di reattori è ora oggetto di studio presso i maggiori laboratori.

È sopratutto al fine di predisporre gli strumenti di calcolo e la rete di sistemi informatici più efficaci per il loro studio che le iniziative di cui si è precedentemente parlato sono state intraprese.

#### REFERENZE

- [1] A. Gandini, «Elementi di Fisica e Calcolo dei Reattori Veloci», Rapporto CNEN RT/FI(79)15.
- [2] R. Jacqmin, «Innovative Reactors: Role and Physical Aspects», Proceed. Workshop on Nuclear Reactors, Physics, Design and Safety, ICTP Trieste, Feb 16 - Mar 20, 2004.
- [3] N. Metropolis and S. Ulam, «The Monte Carlo Method», *Journal of the American Statistical Association*, vol. 44, n. 247, September 1949, pp. 335-341.
- [4] Informazioni dal sito web http://www.cea.fr.
- [5] J. F. Breismeister, ed., «MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B», LA-12625-M. Los Alamos National Laboratory, (1997).
- [6] Both J. P., Derriennic H. Morillon B., and Nimal J. C., «A Survey of TRIPOLI-4», 8 th Int. Conf. on Radiation Shielding, pp. 373, Arlington, Texas, April 24-28, 1994.
- [7] Y.K. Lee, et al., «CRISTAL» Criticality Safety Package Validation: TRIPOLI 4 Monte Carlo, JEF 2.2 Library and ICSBEP Experiments, ICNC '99 Conference - Versailles - September 1999.
- [8] Informazioni dal sito web http://www.canberra.com.
- [9] G. Yagawa, «Recent Progresses in Supercomputing Researches for Nuclear Science and Engineering in Japan», Proceed. SNA-2003 Conference, 22-24 Sept. 2004, Paris.
- [10] A. Bengaouer, L. Loth, «ALLIANCES project: Integration, Analysis and Design Software environment for Storage and Disposal», Proceed. SNA-2003 Confer., 22-24 Sept 2004, Paris
- [11] Informazioni dal sito web http://www.nuresim.org/nuresim-platform.php.
- [12] B. Mercier, et al., «CEA Strategy in the Field of Simulation and High-performance calculations», Proceed. SNA-2003 Conference, 22-24 Sept. 2004, Paris.

#### APPENDICE 1. La piattaforma DESCARTES

#### **DESCARTES: Objectives and products**

#### Design an innovative tool:

- Flexible: from best-estimate calculations to industrial design
- Open: easy coupling with other disciplines (thermo mechanics, thermal hydraulics)
- Enlarged scope: criticality, shielding, all types of reactors
- Robust: well known behavior in its field of application
- · Safe: qualified and uncertainties assessment
- User friendly: user interface, databases
- based on the object oriented method using UML design, programmed in C++ and the Python interpreted script language
- → Design of a toolbox: a set of operators acting on shared data structures

#### **Specifications**

#### **Specifications:**

- The specifications have been realized by the main customers of the project (GEI1, GEI2)
- These specifications cover mainly the first version of the project
- The main objectives for the first phase (until 2005) will cover between 70 and 80% of the whole specifications

#### Link with NURESIM project:

 DESCARTES proposed as a base for WP SP1.2: «Advanced Deterministic Diffusion and Transport Methods»

#### Main objectives for 2005:

• PWR applications, elements for HTR and BWR

#### After 2005:

• HTR, BWR, Fast reactors

#### 2008:

Experimental reactors

#### Main concepts

#### **Component architecture**

• based on 5 levels (shared between SALOME, Neptune and Descartes projects)

#### OO conception:

• UML, C++

#### Standards:

- Open Source: SALOME, Python, STL, smart pointers
- Standardized languages: C++, F77 and F90

#### **Unified Data Model for neutronics:**

- Core and lattice computations
- Deterministic and MC methods

#### APPENDICE 2. Piattaforma ALLIANCES [10]

#### Technical choices

ALLIANCES is based on the Salome platform for the overall graphical user interface (GUI), geometric modelling (CAD), mesh generation, and post-treatment visualisation. Salome is a distributed platform using CORBA as communication protocol. Salome platform is based on «Open Source» software:

The principal technical choices are:

Programming language
 Communication enters components
 Graphic User Interface programming language
 Storage of data

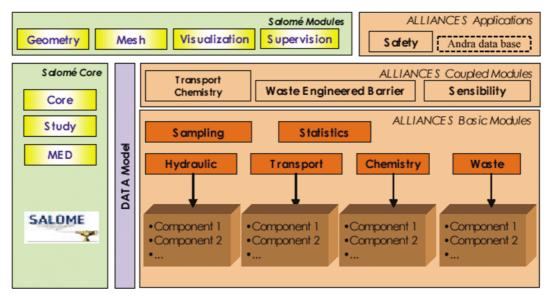
Plant for a final data
HDF format

– Platform of development– Management of configuration– CVS

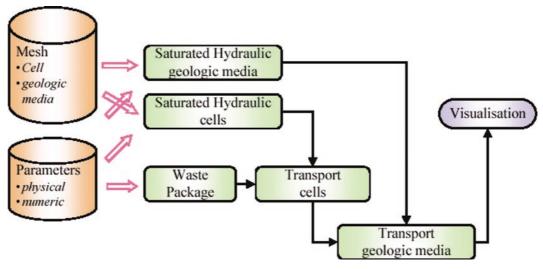
(sources codes, documentation, qualification tests)

The development of the ALLIANCES environment is based on Open Software tools. This choice means that the developments can be published and reinforces the transparency of the waste management studies as regards to the external world.

This approach will enable to put ALLIANCES at the disposal of our partners.



ALLIANCES structure



Example of calculation

#### APPENDICE 3. Il Progetto NURESIM [11]

#### NUclear REactor SIMulation

Nuresim: A EU-FP6 integrated project proposal

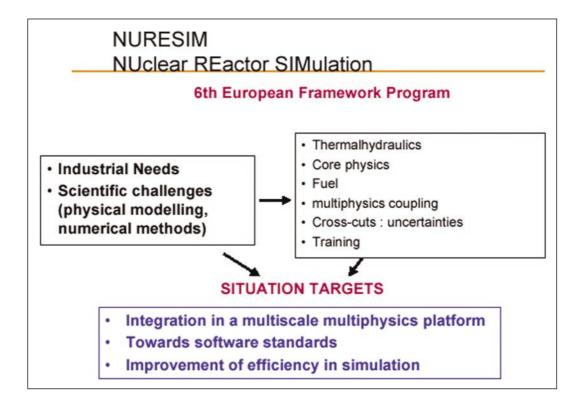
#### **Nuresim short history**

- November 15, 2001 Presentation of NURESIM at Post-FISA-2001 Workshops, EC Luxembourg.
- June 6, 2002: Expression of Interest sent to EC for FP 6 Euratom Thematic Area: Nuclear Safety.
- July 9-10, 2002: First NURESIM Workshop, 21 participants from 10 European countries.
- November 8, 2002. Second NURESIM workshop

#### **Contributing organisations**

Today, the following institutions have expressed their interest in being members of the NURESIM IP:

- CEA (France)
- IRSN (France)
- EDF (France)
- Framatome-ANP
- GRS (Germany)
- FZK (Germany)
- FZR (Germany)
- PSI (Swizerland)
- Serco Assurance (UK)
- ENEA (Italy)
- VTT (Finland)
- LUT (Filand)
- NRG (Netherlands)
- NRI (Czech Republic)
- INRNE (Bulgaria)
- IJS (Slovenia)



#### Models and software for confidence and performance

To build higher confidence and performances for the present and future nuclear reactors (safety, life span and new design), it is of prior importance to prepare a new generation of highly qualified reference physical models and software.

This new generation of software will meet in a single approach performance/safety, best estimate/ conservative simulation objectives:

- By an optimised management of uncertainties
- By improving each disciplinary to limit effective parameters
- By a cross-disciplinary integration to tackle a comprehensive 3D local (rod scale) simulation

This next generation of simulation codes will use a generic set of software tools for pre/post processing and supervision, to concentrate the efforts on the development of advanced nuclear physical models and make a major step towards the collaborative development of the skills, the physics understanding and the experimental knowledge in Europe.

Furthermore, this enhanced collaboration will guarantee to keep a high level of expertise in this domain for the immediate benefit of the whole nuclear industry but also the population through a safer and claner energy production.

APPENDICE 4. I supercomputers presso il CEA [12]

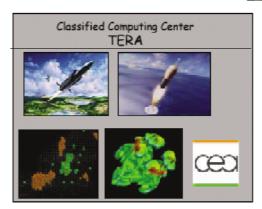
# All machines in France in the 2003/11 supercomputer list

Rank	Manufacturer	Computer	Rmax	Installation Site	Year	Proc	Rpeak
15	Hewlett-Packard	AlphaServer SC45, 1 Ghz	3980.00	Commissariat a l'Energie Atomique (CEA)	2001	2560	5120.00
22	IBM	- Series Cluster Xeon 2.4 GHz - Gig-E	1755.00	TotalFinaElf	2003	1024	4915.20
61	IBM	- Series Cluster Xeon 2.4 GHz - Gig-E	1674.23	SG SGBI	2003	968	4646.40
131	Hewlett-Packard	AlphaServer SC45, 1.25 GHz	1004.00	Commissariat a l'Energie Atomique (CEA)	2003	512	1280.00
167	IBM	- Series Cluster Xeon 2.4 GHz - Gig-E	822.85	IN2P3	2003	384	1843.20
192	SGI	Altix 3700 900 MHz	727.40	Total Exporation Production	2003	256	921.60
264	IBM	- Series 690 Turbo 1.3 GHz, GigEth	590.20	CNRS/IDRIS	2002	256	1331.20
267	Hewlett-Packard	AlphaServer SC45, 1.25 GHz	581.60	Commissariat a l'Energie Atomique (CEA)	2003	288	720.00
280	Fujitsu	VPP5000/64	563.00	Meteo-France	2003	64	614.40
283	Hewlett-Packard Integ	Integrity rx2600 Itanium2 900 MHz	561.00	ID-IMAG / INRIA Rhone-Alpes	2003	208	748.80
349	IBM	SP Power3 375 MHz	494.00	Centre Informatique National (CINES)	2001	472	708.00
358	Hewlett-Packard	SuperDome 875 MHz/HyperPlex	479.50	CIE Gegetel SI	2003	224	784.00
446	Hewlett-Packard	SuperDome 875 MHz/HyperPlex	412.70	IB Solution	2003	192	672.00
467	Hewlett-Packard	SuperDome 875 MHz/HyperPlex	408.20	Government	2003	192	672.00
468	Hewlett-Packard	SuperDome 875 MHz/HyperPlex	408.20	Government	2003	192	672.00
491	SGI	ORIGIN 3000 500 MHz	405.60	Centre Informatique National (CINES)	2002	512	512.00

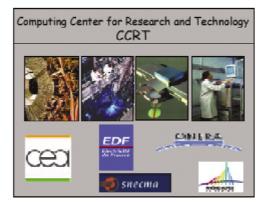
# **CEA Scientific Computing Complex**

All major CEA Scientific Computing systems are installed at CEA/DAM-DIF:

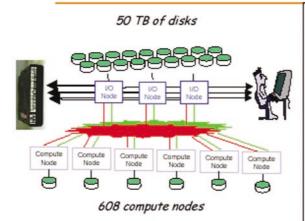
- · Classified (TERA)
- Unclassified (CCRT)







# TERA Supercomputer



Main features		
Installation	December 2001	
Nodes	608(+32)*4 (1 Ghz)	
Peak performance (sustained)	5 Tflops (1 Tflops)	
Main Memory	3 TB	
Disks (Bandwidth)	50 TB (7.5 <i>GB/s</i> )	
Power	600 kW	
170 frames, 90 km of cables		



# Global architecture

